

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKO

Klemen Marolt

**Napovedovanje dobe uporabnosti na
podlagi senzorskih podatkov v hladni
verigi**

MAGISTRSKO DELO
ŠTUDIJSKI PROGRAM DRUGE STOPNJE
RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKA

MENTORICA: doc. dr. Mira Trebar

Ljubljana, 2016

Rezultati magistrskega dela so intelektualna lastnina avtorja in Fakultete za računalništvo in informatiko Univerze v Ljubljani. Za objavljanje ali izkoriščanje rezultatov magistrskega dela je potrebno pisno soglasje avtorja, Fakultete za računalništvo in informatiko ter mentorja.

Zahvaljujem se mentorici doc. dr. Miri Trebar za vso pomoč, nasvete, dobro odzivnost in veliko razumevanja med izdelavo magistrske naloge.

Posebna zahvala gre tudi moji družini, dekletu in sošolcem za vso pomoč, podporo in potrpežljivost tekom študija.

Kazalo

Povzetek

Abstract

1	Uvod	1
2	Opis področja	5
2.1	Hladna veriga	5
2.2	Uporabnost in kakovost živil	6
2.3	Metode napovedovanja dobe uporabnosti	7
2.3.1	Arrheniusov model	7
2.3.2	Model CSIRO	10
2.3.3	Tabela SAL	12
2.4	Obstoječe rešitve	14
3	Doba uporabnosti	17
3.1	Meritve v hladni verigi	18
3.1.1	Testi in opis podatkov	18
3.1.2	Predstavitev temperaturnih meritev	20
3.2	Napoved preostale dobe uporabnosti	25
3.2.1	Namizna aplikacija	25
3.2.2	Rezultati	28
3.3	Dinamični model	34
3.3.1	Definicija	34

3.3.2	Napoved preostale dobe uporabnosti	36
4	Implementacija	41
4.1	Modul SL900A	41
4.1.1	Pomnilnik in beleženje temperatur	43
4.1.2	Ukazi in napake	44
4.2	Čitalec RFID	45
4.2.1	NordicID Morpheic	45
4.2.2	Fiksni čitalec	49
4.3	Mobilna aplikacija - doba uporabnosti	51
4.4	Merjenje temperatur	55
4.5	Eksperiment	57
4.5.1	Test A	59
4.5.2	Test B	61
4.5.3	Mobilna aplikacija	63
4.5.4	Analiza	64
5	Sklepne ugotovitve	67

Seznam uporabljenih kratic

kratica	angleško	slovensko
CRC	Cyclic Redundancy Check	Preverjanje ciklične redundance
CSIRO	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation
EPC	Electronic Product Code	Elektronska oznaka produkta
GRAI	Global Returnable Asset Identifier	Globalni identifikator vračljivega sredstva
GS1	General Specifications	Splošne specifikacije
IoT	Internet of Things	Internet stvari
Koda QR	Quick Response Code	Koda s hitrim odzivom
NFC	Near Field Communication	Komunikacija kratkega dosega
RFID	Radio-Frequency Identification	Radio-Frekvenčna Identifikacija
SL	Shelf Life	Doba uporabnosti
UHF	Ultra High Frequency	Ultra visoka frekvenca
UI	Unique Identifier	Enolični identifikator
USB	Universal Serial Bus	Vsestransko zaporedno vodilo

Povzetek

V celotni prehranski verigi se po svetu zavrže kar tretjino pridelane hrane. Kot enega od razlogov za takšne razmere se pogosto omenja neupoštevanje pogojev hranjenja hitro pokvarljivih živil. Za njih je pomembno vzdrževanje primernih temperatur v hladni verigi, kar zagotavlja ustrezno kvaliteto. V magistrski nalogi je bil razvit model za dinamično napovedovanje preostale dobe uporabnosti ribe, ki je bila pakirana v škatli iz stiropora in pokrita z ledom. Z različnimi testi so bile v procesu skladiščenja in transporta izmerjene temperature okolja in ribe. Arrheniusov model, model CSIRO in tabela SAL so bili uporabljeni za izračun in analizo dobe uporabnosti, ki se spreminja v odvisnosti od časa in temperatur ribe. Primerjava rezultatov in njeno dinamično spreminjanje sta bila skupaj s podatki obstoječih testov osnova za razvoj modela. Najprej se iz temperatur okolja določi temperature ribe in nato iz njih izračuna preostala doba uporabnosti v opazovanem procesu hladne verige. Za praktično uporabo modela je bila izdelana aplikacija na mobilnem čitalcu RFID, ki lahko kadarkoli prebere modul SL900A, prikaže dinamično spreminjanje temperatur okolja in iz njih izračuna preostalo dobo uporabnosti.

Ključne besede

doba uporabnosti, hladna veriga, temperaturni senzorji RFID, dinamična napoved, model CSIRO

Abstract

It is estimated that every year one third of produced food is wasted world-wide during the supply chain. One of the main reasons for such situation is non-compliance with conditions of storage of perishable food. In order to ensure adequate quality it is important to maintain a required temperature during the whole cold chain. We developed a model for dynamic prediction of shelf life for fish that is packed in a box made of styrofoam and covered with ice. Various tests were made where environment and fish temperatures were measured during the storage and transport processes. Arrhenius model, model CSIRO and SAL table were used for prediction and analysis of shelf life which is a function of time and fish temperatures. Comparison of the results together with dynamically changing shelf life and existing tests data were used for model development. At first fish temperatures are calculated from environment temperatures. These are used for remaining shelf life calculation during the cold chain process. An application was developed for mobile RFID reader for practical use on the field. It reads data from RFID module SL900A, displays dynamically changing environment temperatures and predicts remaining shelf life.

Keywords

shelf life, cold chain, RFID temperature sensors, dynamic prediction, CSIRO model

Poglavje 1

Uvod

Po številnih ocenah se v celotni prehranski verigi na svetu letno zavrže 1,3 milijarde ton hrane, v Evropi pa 90 milijonov ton, kar predstavlja tretjino letne proizvodnje. Največ hrane se zavrže v Evropi in drugih razvitih področjih. Taka izguba hrane je prisotna skozi celotno oskrbovalno verigo. Največji delež pa je prisoten na nivoju maloprodaje in potrošnikov [1].

Transport hrane od proizvajalca do končnega kupca lahko poteka tudi po več tisoč kilometrov dolgi poti. Hitro pokvarljiva živila, kot so ribe in drugi mesni izdelki, so med transportom še posebej občutljiva, saj morajo biti ves čas hranjena pri nizki temperaturi. Tako kupci kot prodajalci želijo imeti kvalitetna živila. Informacijo o kvaliteti hrane lahko priskrbimo s pomočjo senzorjev RFID (angl. Radio-Frequency Identification), ki merijo temperaturo hrane v vseh fazah prehranske verige. Ti podatki pa bi bili dostopni preko mobilne aplikacije tako prodajalcem kot tudi potrošnikom. Primer take uporabe je prikazan tudi v [2]. Na ta način bi lahko vsi udeleženci v hladni verigi ob prevzemu videli dinamično izračunan rok uporabe za živila, kjer se je beležila temperatura hranjenja.

Mnogi proizvajalci hrane ne zaupajo vsem, ki sodelujejo v logističnem procesu med proizvajalcem in potrošnikom. Da bi zagotovili dobro kvaliteto hrane pred potekom roka uporabe, proizvajalci pogosto skrajšajo rok uporabe, če bi slučajno prišlo do kakšnih napak v logističnem procesu. Pro-

izvajalcem, prodajalcem in potrošnikom bi bilo v veliko korist, če bi se rok uporabe za hitro pokvarljivo hrano izračunal dinamično na podlagi temperaturnih podatkov zajetih med transportom [1].

Na kvaliteto živil pogosto vpliva nepravilno ravnanje, ki vključuje transport med dvema skladiščema, začasno skladiščenje na višjih temperaturah, odpiranje vrat in druge dogodke. Nadzor temperatur je v tem primeru običajno nezanesljiv ali pa ga ni možno izvesti. Temperaturni senzorji se v kombinaciji s tehnologijo RFID uporabljajo za pridobivanje teh podatkov [2], a še vedno obstaja vprašanje kako bi izvedli dinamično napovedovanja roka uporabe živil na osnovi zbranih meritev v realnem času.

Razvili smo model, ki iz podatkov o temperaturah okolja izračuna temperature ribe v času logističnega procesa. Model predvideva standardno izvedbo hladne verige, ki je razdeljena na štiri faze, pri tem pa je riba ves čas hranjena v škatli iz stiropora in prekrita z ledom. Za napovedovanje dobe uporabnosti smo implementirali tri modele (Arrheniusov model, tabela SAL in model CSIRO) in primerjali rezultate. Model CSIRO se je izkazal za najbolj natančnega.

Izdelali smo prototipno rešitev za testiranje in evaluacijo predlaganih modelov v realnem okolju. Ta vsebuje temperaturne zapisovalnike RFID, s katerimi se spremlja temperaturo med celotno prehransko verigo ter mobilni čitalec RFID, s katerim se prebere podatke in izvede izračune ter prikaz rezultatov. Merijo se temperature okolja v katerem je živilo hranjeno skozi logistični proces. Z razvitim modelom se temperatura okolja preračuna v temperaturo ribe. S podatki, pridobljenimi tekom celotne oskrbovalne verige, lahko dinamično napovemo preostalo dobo uporabnosti. Na ta način bi prodajalci lahko bolj zaupali živilu in rok trajanja bi bil določen bolj natančno. Tudi če bi med transportom prišlo do kakršnekoli napake, ne bi bilo potrebno zavreči hrane, ampak bi se samo na novo preračunal rok uporabe glede na temperaturne podatke. V primeru, da je živilo ves čas hranjeno na dovolj nizki temperaturi pa se lahko doba uporabnosti tudi podaljša (z določenimi priporočili) in tudi tako zmanjša količino zavržene hrane.

Rok uporabe je ponavadi določen kot datum in je natančen na en dan. Zato tudi ne pričakujemo, da bo naš model bolj natančen. Glavni cilj je, da se spremlja, če je bilo živilo pravilno hranjeno in ima takó standardno dobo uporabnosti. V primeru, da živilo ni bilo hranjeno na priporočenih temperaturah, se z razvitim modelom izračuna kakšen vpliv je imela temperatura na razvoj bakterij in pokvarljivost. Tako bo uporabnik lahko vedel, da čeprav je bilo živilo hranjeno pod drugačnimi pogoji, še ni neužitno, ampak ima le skrajšano dobo uporabnosti.

V drugem poglavju je opisano področje hladne verige ter uporabnosti in kakovosti živil. Predstavljeni so trije modeli za napovedovanje dobe uporabnosti (Arrheniusov model, model CSIRO in tabela SAL). Na koncu so navedene tudi obstoječe rešitve na področju sledljivosti v hladni verigi. V tretjem poglavju so predstavljeni testni podatki, s katerimi smo razvijali in testirali dinamični model. Tega smo definirali in primerjali preostalo dobo uporabnosti izračunano s temperaturami rib in z razvitim dinamičnim modelom. V četrtem poglavju je opisana uporabljena strojna oprema ter razvita programska oprema za mobilni čitalec RFID. Predstavljena je tudi izvedba in analiza izvedenega eksperimenta.

Poglavje 2

Opis področja

2.1 Hladna veriga

V sodobnem svetu je zelo razvita logistična infrastruktura, zato se zdi, da so vsi kraji na Zemlji med seboj povezani. Tako je mogoče, da se transportira karkoli od koderkoli in kamorkoli. Še vedno pa med temi kraji ostaja fizična razdalja.

Med transportom lahko pride do poškodb blaga. Navadno blago se lahko poškoduje zaradi udarcev, živila pa so občutljiva na visoke temperature. Zaradi slednjega zahteva hitro pokvarljiva hrana med transportom posebno pozornost, saj mora biti ves čas hranjena pri zahtevani temperaturi. Prehransko verigo z nadzorovano temperaturo imenujemo hladna veriga (angl. Cold Chain) [3].

Hladna veriga se uporablja za transport izdelkov, ki zahtevajo kontrolirano temperaturo. V našem primeru je povezana z ravnanjem z živili, ki so občutljiva na temperaturo in zahteva premišljeno logistično planiranje. Med drugim pa se uporablja tudi za kemikalije, cepiva, druga farmacevtska zdravila ipd. Za zagotavljanje kvalitete živila je potrebno, da so živila hranjena v primerni embalaži in v primerno ohlajenih prostorih skozi vse člene v verigi. V zadnjem času se živila razpošilja po celem svetu in zato morajo biti prevozna sredstva prilagojena, da ohranjajo kvaliteto živil tudi med transpor-

tom. Za zagotavljanje ustrezne kvalitete hladne verige obstajajo prilagoditve standardnih prevoznih sredstev z vgrajenimi hladilnimi napravami. Živila je mogoče prevažati tako v cestnem prometu kot tudi v ladijskem, zračnem in železniškem prometu [3].

Do težav lahko pride, če v enem izmed členov v hladni verigi živilo ni skladiščeno v okviru priporočenih temperatur. Če je bilo dlje časa izpostavljeno neustreznim temperaturam, se lahko zgodi, da živilo pri trgovcu ne bo v skladu s predvideno dobo uporabnosti. Brez sledljivosti se trgovec po vsej verjetnosti sploh ne zaveda kaj se je med transportom dogajalo z živilom.

2.2 Uporabnost in kakovost živil

Živila, kot so mesni in mlečni izdelki, so zelo občutljiva na temperaturo na kateri so hranjena. Doba uporabnosti živila (angl. Shelf Life) pa je odvisna tudi od vlage in živila samega. Kdaj je živilo še primerno za zaužitje se določa z eksperimenti med katerimi se spremlja razmnoževanje bakterij in kvaliteto živila.

Na površini rib in školjk, njihovih škrgh in v črevesju se nahaja na milijone bakterij [4]. Po ulovu ribe se začnejo te bakterije širiti in tako napadajo meso in se tam razmnožujejo. Obravnavajo jih kot razlog za ribji smrad in okus po starih ribah.

Tudi encimi povzročajo pokvarljivost živil. V živih morskih bitjih skrbijo za obnavljanje tkiva, sproščanje mišic in prebavo hrane. Po ujetju encimi delujejo še naprej, vendar le ti začnejo razjedati meso ribe, kar zmanjšuje kvaliteto hrane. Na kvarjenje morske hrane vpliva tudi zrak. Kisik reagira z olji v živilu in tako povzroči slab vonj, okus in žarkost.

Živila imajo določen rok uporabe, kar pomeni, da po tem roku naj ne bi bila več primerna za zaužitje. Za nekatera živila je določena tudi doba, ko je le to najboljše za zaužitje. Kljub temu je užitno tudi kasneje, vendar je slabše kvalitete. Pri ribah je v večini primerov doba uporabnosti skoraj dvakrat daljša kot doba priporočenega zaužitja.

2.3 Metode napovedovanja dobe uporabnosti

V literaturi obstajajo različni pristopi in modeli za določanje dobe uporabnosti. Nekateri imajo poudarek na razvoju bakterij, drugi pa so osredotočeni zgolj na dobo uporabnosti. Huangov ter Baranyjev in Robertsonov model [5] analizirata razvoj bakterij in pri izračunu upoštevata mnoge dejavnike, ki vplivajo na razvoj bakterij. Prav tako oba modela ločujeta med različnimi bakterijami. Za posamezne bakterije lahko izračunamo koliko se jih je razvilo, potem pa moramo uporabiti drug model za izračun dobe uporabnosti. Ta način je uporaben, če imamo na voljo temperature živila, za natančen izračun pa potrebujemo še mnogo drugih podatkov o kemičnih značilnostih živila. Ker v našem primeru nimamo teh podatkov in želimo narediti model čimbolj splošen, omenjena modela za naše potrebe nista primerna.

V nadaljevanju so predstavljeni trije modeli (Arrheniusov, CSIRO in tabela SAL), ki smo jih uporabili v magistrski nalogi za izračun dobe uporabnosti živila na podlagi izmerjenih temperatur v hladni verigi. Arrheniusov model je bolj kompleksen in temelji na kemijskih zakonitostih ter upošteva faktorje, ki vplivajo na kemijske reakcije. Druga dva modela sta razvita na podlagi eksperimentov z merjenjem temperatur in analizo drugih testov ter poenostavljena za napovedovanje roka uporabnosti. Pri samem izračunu se ne upošteva podrobnosti s področja biokemije. Model razvit v CSIRO računa dobo uporabnosti s preprosto enačbo. Tretji model pa uporablja tabelo SAL, v kateri so podani izračuni za dobo uporabnosti pri določeni temperaturi.

2.3.1 Arrheniusov model

Arrheniusov model temelji na sistematičnem pristopu za modeliranje dobe uporabnosti za ribe v hladni verigi. V študiji so opazovali obnašanje naravne mikroflore pri ribah in nato definirali model za razvoj bakterij, ki zmanjšujejo dobo uporabnosti živila [6].

Razvoj bakterij

V modelu so upoštevane kemijske zakonitosti o poteku reakcij. Reakcije pri višjih temperaturah skoraj vedno potekajo hitreje. Arrhenius je ugotovil, da lahko z enačbo zapišemo hitrost reakcije v odvisnosti od temperature. Odvisna je tudi od aktivacijske energije in splošne plinske konstante R ($8,314 \text{ J/molK}$). Odraža se v obliki konstante, ki določa kolikokrat hitreje steče reakcija pri neki temperaturi T v primerjavi z referenčno temperaturo T_{ref} , ko so reaktanti v najbolj stabilnem stanju [7].

Aktivacijska energija (E_a) je najmanjša količina energije, ki je potrebna, da steče kemijska reakcija za razvoj bakterij. Parameter E_a je odvisen od vrste reakcije in reaktantov. Določen je eksperimentalno, tako da se dovaja energija in spremlja kdaj se bakterije začnejo razvijati in v kakšnem obsegu [7]. E_a je za različne bakterije različna. Ker se na živilu razvija več bakterij, se lahko vzame povprečno E_a , saj za reakcije na živilih ni večjih odstopanj [8].

Aktivacijsko energijo se določa s pomočjo eksperimentov, zato so lahko pri različnih eksperimentih dobljene različne vrednosti. Dobljena E_a ni povsem točna, je pa njena vrednost v razponu $\pm 20 \text{ kJ/mol}$ dovolj natančna za računanje dobe uporabnosti živila [6]. Pri različnih temperaturah se E_a spreminja, saj na razvoj bakterij vpliva veliko dejavnikov. Pri višjih temperaturah je vrednost manjša [9]. Zaradi tega je pri nekaterih modelih navedeno, da so primerni le v določenem temperaturnem razponu.

Model

Za izračun dobe uporabnosti je bila z uporabo časovnih temperaturnih indikatorjev [6] razvita Arrheniusova enačba 2.1 v obliki eksponentne funkcije. E_a je aktivacijska energija, R je splošna plinska konstanta, T_i je temperatura na kateri je hranjeno živilo pri i -ti meritvi, T_{ref} pa je referenčna temperatura. To je priporočena temperatura za živilo, pri kateri je najdlje uporabno. Rezultat enačbe je koeficient za i -to meritev (k_i), ki pove kolikokrat hitreje se je

odvijala reakcija pri temperaturi T v primerjavi z reakcijo, ki bi se odvijala pri referenčni temperaturi T_{ref} . Temperature so podane v enoti K (Kelvin).

$$k_i = \exp\left(\frac{-E_a}{R}\left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right) \quad (2.1)$$

Izračunan koeficient k_i se nanaša na i -to meritev in določa, da je v času t_i , ko je bilo živilo hranjeno na temperaturi T_i , preteklo $t_i \times k_i$ dobe uporabnosti, pri čemer velja $k_i \geq 1$. Preostala doba uporabnosti (SL) po vseh meritvah je definirana z enačbo 2.2. N je število meritev, t_i je interval med meritvami, SL_{ref} pa je referenčna doba uporabnosti živila pri hranjenju na priporočeni temperaturi.

$$SL = SL_{ref} - \sum_{i=1}^N k_i \times t_i \quad (2.2)$$

Uporabo enačb 2.1 in 2.2 je mogoče demonstrirati na preprostem primeru:

$$SL_{ref} = 10 \text{ d}$$

$$N = 1$$

$$t_1 = 12 \text{ h}$$

$$T_{ref} = 0 \text{ °C} = 273,15 \text{ K}$$

$$T_1 = 4 \text{ °C} = 277,15 \text{ K}$$

$$R = 8,314 \text{ J/molK}$$

$$E_a = 59,6 \text{ kJ/mol [10]}$$

$$\begin{aligned} k_1 &= \exp\left(\frac{-E_a}{R}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right) = \\ &= \exp\left(\frac{-59600 \text{ J/mol}}{8,314 \text{ J/molK}}\left(\frac{1}{277,15 \text{ K}} - \frac{1}{273,15 \text{ K}}\right)\right) = 1,46 \end{aligned}$$

$$SL = SL_{ref} - \sum_{i=1}^N k_i \times t_i = SL_{ref} - k_1 \times t_1 = 10 \text{ d} - 1,46 \times 0,5 \text{ d} = 9,27 \text{ d}$$

Če je bilo živilo 12 ur (0,5 d) na temperaturi 4 °C, pomeni, da je v tem času preteklo $0,5 \times 1,46 = 0,73$ dni ekvivaletne dobe uporabnosti. V tem primeru ima samo še 9 dni in 6,5 ur (10 d - 0,73 d) dobe uporabnosti.

Model je mogoče definirati tudi z enačbo 2.4, kjer koeficient k_{SL} (enačba 2.3) pove za koliko se zmanjša referenčna doba uporabnosti SL_{ref} na temperaturi T . Tukaj je E_a pozitivna vrednost zato velja $0 \leq k \leq 1$.

$$k_{SL} = \exp\left(\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right) \quad (2.3)$$

$$SL = SL_{ref} \times k_{SL} \quad (2.4)$$

Če ima živilo referenčno dobo uporabnosti $SL_{ref} = 10$ dni in je hranjeno na $T = 4$ °C, potem je $k_{SL} = 0,68$. Živilo, ki je hranjeno na 4 °C ima torej samo 6,8 dni ($10 \text{ dni} \times 0,68$) dobe uporabnosti.

2.3.2 Model CSIRO

V avstralski organizaciji CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation) so po večletnih raziskavah razvili svoj model za napovedovanje dobe uporabnosti [11]. Definirali so preprosto matematično enačbo za razvoj bakterij v živilu (v nadaljevanju model CSIRO).

Avtorji so potrdili, da je model kljub svoji preprostosti dovolj natančen za napovedovanje dobe uporabnosti živil. Razvit je tako, da je uporaben za različna živila. Odvisen je od temperature živila (T (°C)) in ne od okolice, v kateri je živilo hranjeno. Enačba pravilno upošteva biokemijske spremembe med temperaturami od -2 °C do 20 °C. Izračun je natančen na eno decimalko.

Z enačbo 2.5 izračunamo koeficient k , ki nam pove kolikokrat večja oz. manjša je pokvarljivost pri določeni temperaturi od pokvarljivosti pri 0 °C.

$$k = (0,1T + 1)^2 \quad (2.5)$$

Koeficient k določa, da je v času t , ko je bilo živilo hranjeno na temperaturi T , preteklo $t \times k$ dobe uporabnosti. Če je živilo 1 dan na temperaturi 4 °C, dobimo $k \approx 2$, kar pomeni, da sta v enem dnevu pretekla dva ekvivalentna dneva dobe uporabnosti v idealnih razmerah. Primer izračuna:

$$k = (0,1 \times 4 + 1)^2 = 1,96 \approx 2$$

Tudi za ta model velja, da se lahko posamezne pretvorjene ekvivalentne dobe uporabnosti v idealnih pogojih sešteva. Če je živilo 4 ure na 4 °C ($k = 2$) in 7 ur na 10 °C ($k = 4$), potem je v 11 urah preteklo 36 ($4 \times 2 + 7 \times 4$) ur ekvivaletne dobe uporabnosti v idealnih pogojih.

V tabeli 2.1 je predstavljeno kako se spreminja preostala doba uporabnosti pri hranjenju živila določen čas na neki temperaturi. Primer izračunov je narejen za ribo brancin, za katero velja, da pri 0 °C ostaja kvaliteten 8 dni. Za izračun koeficienta k je bila uporabljena enačba 2.5. Preostala doba uporabnosti pa je preračunana z enačbo 2.6.

$$SL = SL_{ref} - t \times k \quad (2.6)$$

T(°C)	k	t(dan)					
		0,125	0,5	1	2	4	8
0	1	7,9	7,5	7,0	6,0	4,0	0,0
1	1,2	7,9	7,4	6,8	5,6	3,2	/
2	1,4	7,8	7,3	6,6	5,2	2,4	/
4	2	7,8	7,0	6,0	4,0	0,0	/
8	3,2	7,6	6,4	4,8	1,6	/	/
10	4	7,5	6,0	4,0	0,0	/	/
20	9	6,9	3,5	/	/	/	/

Tabela 2.1: Izračun preostalih dob uporabnosti pri hranjenju živila določen čas pri neki temperaturi. Vrednosti so preračunane za brancina, ki ima dobo uporabnosti pri 0 °C (idealni pogoji) enako 8 dni.

Pri 0 °C so za brancina idealni pogoji in vidimo, da mu pri tej temperaturi kvalitetna doba poteče točno po 8 dneh. Pri temperaturi 4 °C ($k = 2$) je pokvarljivost podvojena in tako živilu po 12 urah ostane samo še 7 dni (od prvotnih 8 dni). Polja, ki ne vsebujejo vrednosti, pomenijo, da je živilu potekla doba uporabnosti.

2.3.3 Tabela SAL

V raziskavi [4] so predstavili kakšen je koeficient pokvarljivosti za morsko hrano pri določenih temperaturah. Iz predstavljenih izračunov je mogoče razbrati koliko dni ekvivaletne dobe uporabnosti je preteklo, če je bilo živilo določen čas na poznani temperaturi. V tabeli je za temperaturo uporabljena enota °F (stopinje Fahrenheit). Za naše potrebe smo temperature pretvorili v °C.

Za brancina velja, da ima v idealnih pogojih dobo uporabnosti 8 dni. Končni podatki, ki so uporabljeni za našo aplikacijo so predstavljeni v tabeli 2.2.

T(°C)	SL(d)	T(°C)	SL(d)	T(°C)	SL(d)	T(°C)	SL(d)
0	8	8	2,7	16	1,1	24	0,75
1	6,5	9	2,35	17	1	25	0,73
2	5	10	2	18	0,92	26	0,71
3	4	11	1,75	19	0,89	27	0,69
4	3,5	12	1,5	20	0,85	28	0,67
5	3,35	13	1,4	21	0,83	29	0,62
6	3,15	14	1,3	22	0,8	30	0,6
7	3	15	1,2	23	0,78		

Tabela 2.2: Tabela SAL, ki se uporablja za napovedovanje dobe uporabnosti. Živilo je na temperaturi, ki je v stolpcu **T(°C)**, uporabno določeno število dni (stolpec **SL(d)**).

Uporablja se tabela, ki ima za vsako temperaturo navedeno koliko časa je živilo uporabno, če je ves čas hranjeno na taki temperaturi. Živilo je najdlje uporabno pri določeni temperaturi (0 °C). Če pride do odstopanja od te temperature, se potem preostala doba ustrezno zmanjša. V tabeli 2.2 je razvidno, da je v idealnih pogojih (0 °C) brancin kvaliteten 8 dni. Pri 3 °C se mu kvalitetna doba razpolovi na 4 dni, pri 10 °C pa je ta doba samo še 2 dni.

Algoritem za izračun preostale dobe uporabnosti najprej izračuna koeficient pokvarljivosti pri neki temperaturi. Koeficient za i -to meritev je definiran z enačbo 2.7, kjer je t_{ref} referenčna doba uporabnosti pri priporočenih temperaturah hranjenja, t_{SAL} pa je doba uporabnosti pri temperaturi T , prebrana iz tabele SAL.

$$k_i = t_{ref}/t_{SAL} \quad (2.7)$$

Vsako meritev se zaokroži na najbližje celo število. Za meritve, ki so večje od 30 °C, se uporabi koeficient za 30 °C, pri negativnih temperaturah pa k_i pri 0 °C. Na koncu izračunamo SL tako, da od SL_{ref} odštejemo porabljen dobo uporabnosti (enačba 2.8), kjer je t_i interval, ko je bilo živo izpostavljeno temperaturi T .

$$SL = SL_{ref} - \sum_{i=1}^N k_i \times t_i \quad (2.8)$$

Primer za ribo, ki je bila 1 dan hranjena na temperaturi 2,8 °C:

$$t = 1 \text{ dan}$$

$$T = 2,8^\circ\text{C}(=> 3^\circ\text{C})$$

$$t_{ref} = SL_{ref} = 8 \text{ dni}$$

$$N = 1$$

$$t_{SAL} = 4 \text{ dni}$$

$$k = t_{ref}/t_{SAL} = 8/4 = 2$$

$$t \times k = 1 \times 2 = 2$$

$$SL = SL_{ref} - \sum_{i=1}^N k_i \times t_i = SL_{ref} - k \times t = 8 - 2 = 6$$

Vrednost t_{SAL} smo razbrali iz tabele SAL, vrednost $k = 2$ pa pove, da je riba na 3 °C dvakrat bolj pokvarljiva. Ker je bila riba 1 dan hranjena na temperaturi 3 °C, je v tem času preteklo 2 dni ekvivalentne dobe uporabnosti. Ker je $t_{ref} = 8$ dni, je živo po enem dnevu na 3 °C uporabno samo še 6 dni.

2.4 Obstoječe rešitve

Internet stvari (angl. Internet of Things) pridobiva v zadnjih letih vse večji pomen [12]. Na tem področju se pogosto uporabljajo značke, senzorji in mobilni telefoni, ki podpirajo tehnologijo RFID. Ta je pomembna na mnogih področjih kot so logistika, transport, medicina, pametne hiše in privatno življenje. Uporaba senzorjev v povezavi s tehnologijo RFID predstavlja številne koristi tako za uporabnike kot tudi za poslovni proces.

Na področju transporta in logistike je možno zapisovalnike podatkov RFID s senzorji uporabiti za sledenje izdelkom, tako med proizvodnjo kot tudi med transportom. Za občutljive izdelke se lahko s senzorji izvaja meritve in spremlja parametre v času skladiščenja ali transporta. Med take izdelke spada tudi hrana, za katero je pomembno, da je skladiščena na primerni temperaturi vse od začetka do končnega uporabnika. Obstaja pa še mnogo več možnosti za nadzor živil in težave, ki nastajajo pri vpeljavi IoT v nek proces.

V prehranski verigi je mogoče z uvedbo pametnih naprav zmanjšati stroške in povečati skalabilnost sistema [2]. Namesto delno pasivnih senzorjev RFID uporabijo pasivne značke RFID in le en skupni senzor za celoten tovornjak. Zmanjša se obseg komunikacije z zalednim sistemom in končnemu kupcu omogoča, da se lahko tudi s svojim telefonom prepriča o svežini živila.

Namen projekta DynahMat [1] je zmanjšanje količine zavržene hrane s pomočjo dinamičnega napovedovanja roka uporabe. Študija [13] pa iz poslovnega vidika analizira priložnosti in izzive pri izvedbi takšnega projekta. Omenja številne pridobitve in navaja težave, ki so vezane na sodelovanje vseh členov v verigi.

Evropski projekt 'RFID From Farm to Fork' [14] je bil namenjen uporabi radio-frekvenčne tehnologije (Radio Frequency Identification - RFID) v prehranski verigi. Implementiran je bil sistem RFID za izvedbo sledljivosti živil s ciljem, da potrošniku zagotovi informacije o izvoru, kakovosti, sestavi in ravnanju z živili, ki se znajdejo na njegovi mizi. V pilotni izvedbi je sodelovalo slovensko podjetje ribogojnica Fonda.si d.o.o., kjer je bilo omogočeno slede-

nje rib od ribogojnice do prodajnega mesta oziroma direktno do potrošnika. Ker je v prehranski verigi svežih živil pomemben tudi nadzor temperatur za zagotavljanje hladne verige, je bilo z uporabo senzorja v zapisovalniku podatkov RFID izvedeno merjenje temperatur. Te so bile kasneje uporabljene za prikaz uporabniku.

Mobilna aplikacija za potrošnike. S projektom RFID-F2F [15] so želeli z uporabo tehnologije RFID zagotoviti sledljivost v celotni hladni verigi. Na to temo je bilo razvitih nekaj aplikacij v okviru diplomskih del. Mobilna aplikacija TColdChain [16] omogoča, da telefon kot vhodno informacijo dobi EPC (angl. Electronic Product Code) temperaturnega senzorja. Informacijo lahko dobi s pomočjo značke NFC (angl. Near Field Communication) ali kode QR (angl. Quick Response Code), podana pa je v obliki spletnega naslova, ki kaže na spletno stran, kjer so predstavljane pomembne informacije za uporabnika. Uporabnik lahko vidi kaj se je dogajalo z ribo skozi celotno hladno verigo. To vsebuje temperaturni graf, časovno premico z dogodki, ki so bili vključeni (ulov, pakiranje, hranjenje v hladilnici, transport, dostava) in točke na zemljevidu, kjer se je riba nahajala.

Sistem s senzorji RFID. Za potrebe testiranja razvitih modelov za napovedovanje dobe uporabnosti živil v hladni verigi je bilo potrebno vzpostaviti celoten sistem z uporabo tehnologije RFID [15]. Avtorji so opisali tehnične podrobnosti uporabe tehnologije RFID v hladni verigi. Navedeno je, da so pri svoji raziskavi uporabili fiksni in prenosni čitalec RFID ter temperaturne senzorje z moduli RFID, ki beležijo izmerjeno temperaturo. Opisali so postopek za izvedbo eksperimenta in katere korake v hladni verigi so spremljali. Razvili so programsko opremo namenjeno sledenju živil v hladni verigi, vendar sistem ni bil povsem avtomatski za shranjevanje temperatur.

Poglavje 3

Doba uporabnosti

Za izračun dobe uporabnosti bi bilo idealno, če bi lahko merili temperature ribe vse od ulova pa do končne uporabe živila. Dobljene podatke bi uporabili za modeliranje razvoja bakterij in nato napovedovanje preostale dobe uporabnosti.

Hladna veriga in nadzor temperatur predstavljata osnovo za upoštevanje pogojev hranjenja živil. Pomembno je poznavanje in razumevanje tveganj in drugih parametrov, ki vplivajo na dinamične modele [1]. Izveden je bil intervju v katerem so sodelovali predstavniki posameznih faz v hladni verigi. Avtorji so navedli zahteve in izzive, ki jih je mogoče pričakovati. Raziskali so vpliv majhnih sprememb temperature na dobo uporabnosti hitro pokvarljivih živil.

Za shranjevanje rib je najbolj ustrezna temperatura 0 °C, ker je takrat razvoj bakterij minimalen [17]. Zagotovljena je z uporabo drobljenega ledu pri pakiranju. Proizvajalci lahko pri označevanju v skladu z zakonodajo določijo priporočeno temperaturo med 0 °C in 4 °C. Z upoštevanjem teh pogojev je potem zagotovljena tudi navedena doba uporabnosti. Kakršenkoli odmik od teh temperatur bistveno pospeši razvoj bakterij in tako skrajša dobo uporabnosti.

Če je led izpostavljen temperaturi malo nad lediščem, se zelo počasi tali in tako zagotavlja vlago, kar preprečuje, da bi se riba sušila. Voda, ki nastaja s

taljenjem ledu, je zelo dober toplotni prevodnik in tako služi tudi za hlajenje ribe.

Doba uporabnosti z naraščajočo temperaturo hitro pada. Za ribo se lahko razpolovi že pri 3-4 °C. Če ima živilo pri 0 °C dobo uporabnosti 8 dni, je pri višji temperaturi, kjer je pokvarljivost podvojena, uporabno samo 4 dni. Tako velja, da je v 4 dneh preteklo 8 dni ekvivalentne dobe uporabnosti.

3.1 Meritve v hladni verigi

3.1.1 Testi in opis podatkov

Nadzor temperatur v hladni verigi je bil zasnovan v projektu RFID-F2F in je potekal v letih 2012 do 2015 [14]. Rezultati so bili shranjeni in urejeni v šest testov (tabela 3.1). Opravljeni so bili v sodelovanju s podjetjem Fonda d.o.o. v fazah skladiščenja v hladilnici, transporta do Fakultete za računalništvo in informatiko ter hranjenja na sobni temperaturi ali v hladilniku. Za vsak test so shranjene meritve temperatur v enakih časovnih intervalih za okolje in za ribo, ki je zapakirana v škatli z ledom. Podatki so zapisani v datotekah .csv (angl. Comma Separated Values).

Test	Izvedba	Št. meritev	Čas (h)
Test 1	16.5.2012 - 18.5.2012	470	47
Test 2	18.4.2013 - 19.4.2013	293	29
Test 3	16.9.2013 - 18.9.2013	515	51
Test 4	28.4.2014 - 29.4.2014	231	23
Test 5	14.7.2014 - 15.7.2014	278	28
Test 6	16.7.2015 - 18.7.2015	481	48

Tabela 3.1: Testi v hladni verigi - podatki o temperaturah okolja in rib.

V glavi datoteke so najprej navedeni meta podatki, nato pa jim sledijo zaporedne meritve temperature. Tabela 3.2 vsebuje zapise prvih sedmih vrstic in opise parametrov, ki določajo izvedbo hladne verige za test 2.


```

EPC, 3000330D6D430680010000000001 ,
Sal Version ,3.2 ,
Logging Mode, Dense ,
Start Time, 18 Apr 2013, 15:50:00
Log Interval ,360 ,
T_correct ,0 ,
sample_no , temperature ,
0 ,7.319213 ,
1 ,2.830269 ,
2 ,2.291596 ,
:

```

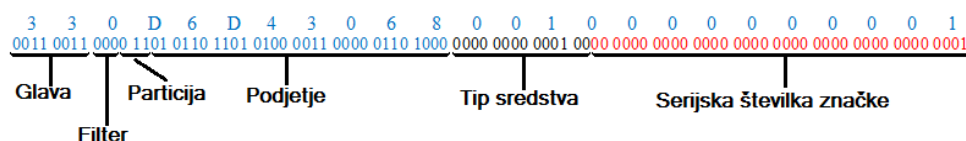
Vrstica	Opis
1.	Koda EPC, ki predstavlja identifikacijsko številko naprave s katero so bile opravljene meritve.
2.	Verzija programa, s katerim je bila ustvarjena datoteka.
3.	Način beleženja temperatur. Dense - zaporedne meritve za izbran interval beleženja.
4.	Datum in ura začetka beleženja temperatur.
5.	Interval beleženja temperatur v sekundah.
6.	Morebitno odstopanje meritev. Če je bilo za uporabljen zapisovalnik ugotovljeno odstopanje, je vrednost različna od 0 in je potrebno meritvam prišteti zapisano vrednost.
7.	Opis podatkov, ki sledijo v nadaljevanju datoteke. Prvi podatek je zaporedna številka meritve, drugi podatek pa izmerjena temperatura, ki je predstavljena s 6 decimalnimi mesti.

Tabela 3.2: Opis meta podatkov v glavi testne datoteke.

Koda EPC ima po standardu GS1 [18] opredeljeno strukturo, ki v 96 bitih zajema informacije o podjetju, tipu sredstva, ki je označeno z značko RFID, in serijsko številko značke RFID.

Slika 3.1 prikazuje strukturo kode EPC (330D6D430680010000000001) v

binarnem zapisu. Glava, filter in particija določajo format zapisa za sredstvo, to je GRAI (angl. Global Returnable Asset Identifier). Podjetje ima oznako 383004776 (Fonda d.o.o), kar predstavlja desetiško število, ki je v kodi EPC predstavljen s 30 biti, tip sredstva je predstavljen s 14 biti, serijska številka značke RFID pa z 38 biti.



Slika 3.1: Struktura kode EPC

3.1.2 Predstavitev temperaturnih meritev

Za vsak test hladne verige so v nadaljevanju podani podrobnejši opisi s časovnim potekom in posameznimi fazami, kjer se pogoji hranjenja spreminjajo v odvisnosti od izmerjenih temperatur. Ker je bila riba v škatli iz stiropora in prekrita z ledom, se njene temperature bistveno razlikujejo od temperature okolja. Interval beleženja meritev je bil 6 minut.

Pri večini testov je mogoče v grafih opaziti posamezne špice predvsem pri temperaturi okolja. Začasna višja temperatura je posledica odpiranja vrat hladilnice ali kombija. V hladilniku pa je nihanje temperatur jasno vidno v časovnih intervalih delovanja naprave.

Test 1

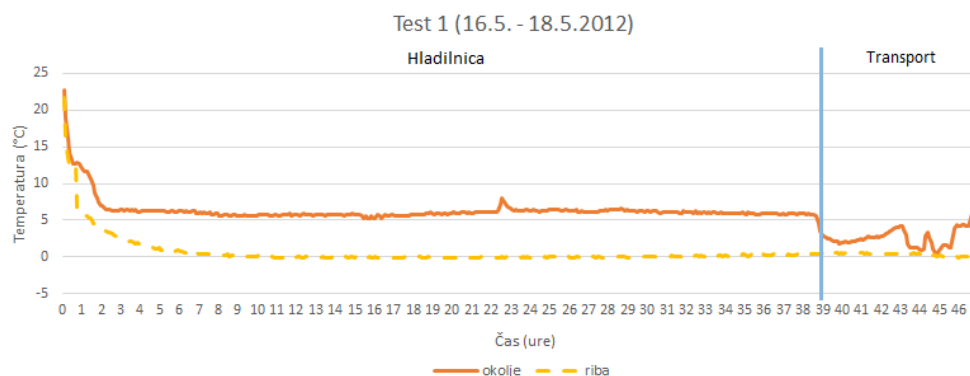
Čas beleženja: Od 16.5.2012 14:24 do 18.5.2012 13:18 (470 meritev)

Faze:

- Hladilnica - od 16.5.2012 14:24 do 18.5.2012 5:06 (388 meritev)
- Transport - od 18.5.2012 5:12 do 18.5.2012 13:18 (82 meritev)

Opis: Najbolj preprost test. Gibanje temperatur je prikazano na sliki 3.2. Riba je bila najprej 39 ur v hladilnici, potem pa je sledila faza transporta. Takrat so se temperature okolja znižale saj je bila škatla z ribo

v kombiju s hladilno napravo. Odpiranje vrat pa je povzročalo nihanje temperatur.



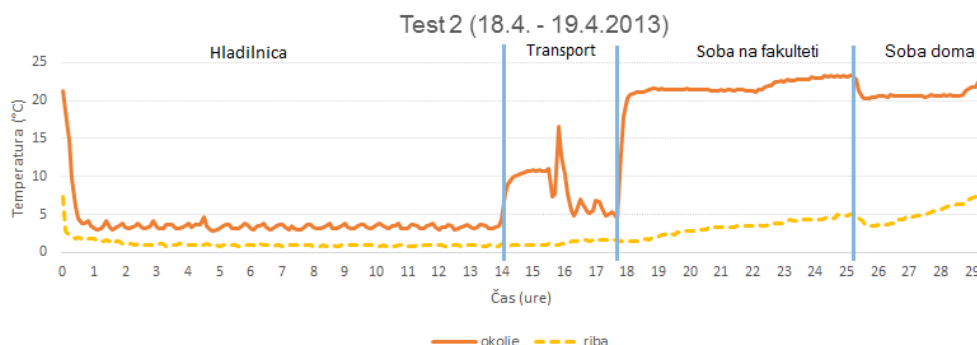
Slika 3.2: Test 1 - Temperature okolja in ribe v hladilnici (39 ur) in med transportom (8 ur).

Test 2

Čas beleženja: Od 18.4.2013 15:48 do 19.4.2013 21:00 (293 meritev)

- Faze:
- Hladilnica - od 18.4.2013 15:48 do 19.4.2013 05:48 (141 meritev)
 - Transport - od 19.4.2013 5:54 do 9:30 (37 meritev)
 - Soba na fakulteti - od 19.4.2013 9:36 do 16:54 (74 meritev)
 - Avto (prevoz do doma) - od 19.4.2013 17:00 do 17:18 (4 meritve)
 - Doma v sobi - od 19.4.2013 17:24 do 21:00 (37 meritev)

Opis: Gibanje temperatur je prikazano na sliki 3.3. Ta test je bil bolj dinamičen kot prvi. Paket (škatla z ledom in ribo) je bil najprej 14 ur v hladilnici. Nihanje temperature okolja v tem času je posledica vklapljanja in izklapljanja hladilne naprave. Iz hladilnice je bil paket v hlajenem kombiju poslan na Fakulteto za računalništvo in informatiko, zato je tudi prihajalo do nihanja v naslednjih 3,6 urah. Tam je bil na sobni temperaturi in počasi se je dvigala tudi temperatura ribe, ker se je led že talil.



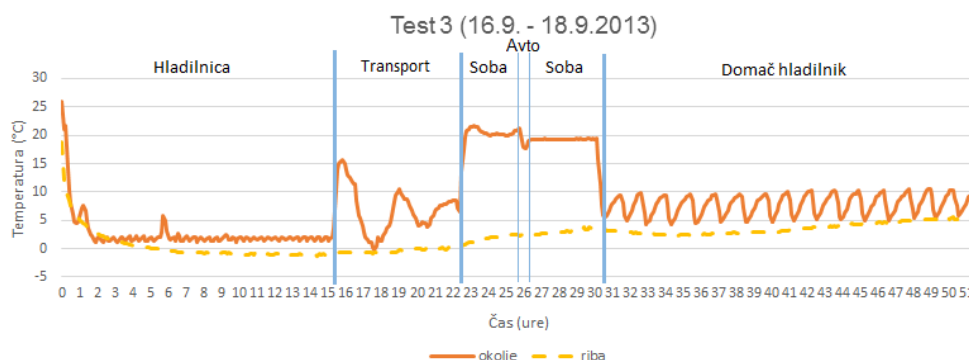
Slika 3.3: Test 2 - Temperature okolja in ribe v hladilnici (14 ur), med transportom (4 ure) in na sobni temperaturi (11 ur).

Test 3

Čas beleženja: Od 16.9.2013 14:04 do 18.9.2013 17:28 (515 meritev)

- Faze:
- Hladilnica - od 16.9.2013, 14:04 – do 17.9.2013, 5:22 (154 meritev)
 - Transport - od 17.9.2013 5:28 do 12:28 (71 meritev)
 - Soba - od 17.9.2013 12:34 do 15:52 (34 meritev)
 - Avto - od 17.9.2013 15:58 do 16:34 (7 meritev)
 - Soba - od 17.9.2013 16:40 do 20:10 (36 meritev)
 - Hladilnik - od 17.9.2013 20:16 do 18.9.2013 17:28 (213 meritev)

Opis: Gibanje temperatur je prikazano na sliki 3.4. Riba je bila najprej dobrih 15 ur v hladilnici nato pa še 7 ur v transportu. Nato je bil paket 8 ur hranjen na sobni temperaturi, od tega 1 uro v avtu. Po skupno 30 urah je bil paket za 21 ur prestavljen v domač hladilnik, kjer je vidno nihanje temperature. Razlog za to je vklapljanje in izklapljanje hladilnika, ki zagotavlja konstantno temperaturo. Tukaj je nihanje precej bolj očitno kot v hladilnici.



Slika 3.4: Test 3 - Temperature okolja in ribe v hladilnici (15 ur), med transportom (7 ur), pri hranjenju na sobni temperaturi (8 ur) in v domačem hladilniku (21 ur).

Test 4

Čas beleženja: Od 28.4.2014 12:24 do 29.4.2014 11:24 (231 meritev)

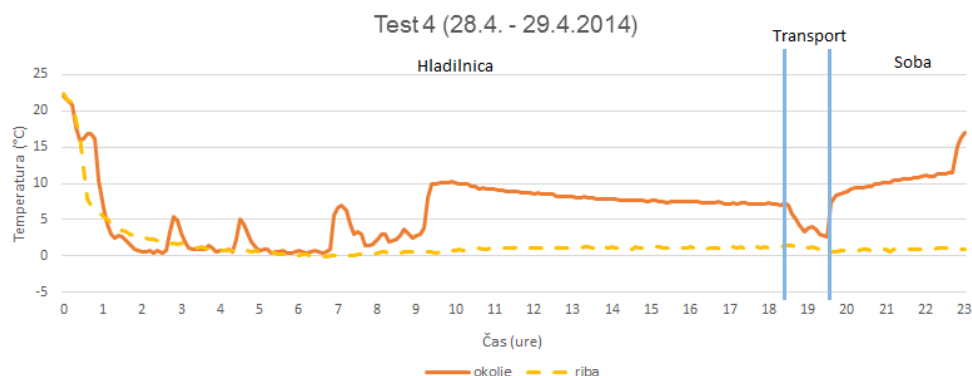
- Faze:
- Hladilnica - od 28.4.2014 12:24 do 29.4.2014 6:30 (182 meritev)
 - Transport - od 29.4.2014 6:36 do 8:00 (15 meritev)
 - Soba - od 29.4.2014 8:06 do 11:06 (31 meritev)
 - Avto - od 29.4.2014 11:12 do 11:24 (3 meritve)

Opis: Gibanje temperatur je prikazano na sliki 3.5. Paket je bil 18 ur hranjen v hladilnici. Potem je bil 1,5 ure v transportu in nato še 3 ure na sobni temperaturi. Nihanja temperatur so povezana z odpiranjem vrat hladilnice.

Test 5

Čas beleženja: Od 14.7.2014 13:28 do 15.7.2014 17:10 (278 meritev)

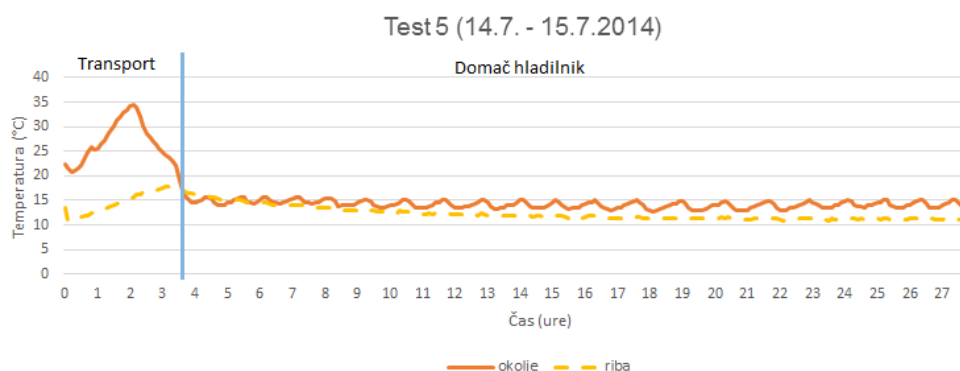
- Faze:
- Transport v avtu - od 14.7.2014 13:28 do 16:52 (35 meritev)
 - Hladilnik - od 14.7.2014 16:58 do 15.7. 2014, 17:10 (243 meritev)



Slika 3.5: Test 4 - Temperature okolja in ribe v hladilnici (18 ur), med transportom (1,5 ure) in hranjenjem v sobi (3 ure).

Opis: Gibanje temperatur je prikazano na sliki 3.6. Za razliko od ostalih testov je bila tukaj riba v škatli brez ledu. Zaradi tega so si temperature okolja in ribe zelo podobne. Beleženje temperatur se je pričelo s transportom, kjer je bila škatla 3,5 ure v avtu. Zato so tudi tako visoke temperature v začetnih urah. Sledilo je 24 ur hranjenja v domačem hladilniku.

Ta test ni primeren za izgradnjo dinamičnega modela, saj brez ledu ne ustreza standardni izvedbi hladne verige.



Slika 3.6: Test 5 - Temperature okolja in ribe med transportom v avtu (3,5 ure) in v domačem hladilniku (24 ur). Riba ni bila pokrita z ledom.

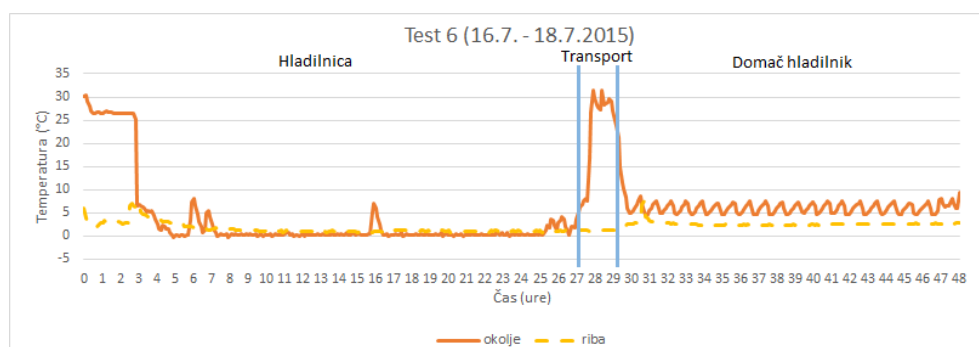
Test 6

Čas beleženja: Od 16.7.2015 11:10 do 18.7.2015, 11:10 (481 meritev)

Faze:

- Hladilnica - od 16.7.2015 11:10 do 17.7.2015 15:40 (286 meritev)
- Transport v avtu - od 17.7.2015 15:46 do 17:40 (20 meritev)
- Hladilnik - od 17.7.2015 17:46 do 18.7. 2015 11:10 (175 meritev)

Opis: Gibanje temperatur je prikazano na sliki 3.7. Riba je bila najprej slabih 29 ur v hladilnici. Sledil je dvourni transport v osebni avtu in nato še 18 ur hranjenja v domačem hladilniku. Špice, ki jih vidimo v fazi hranjenja v hladilnicu so posledica odpiranj hladilnice ravno v času, ko se je merila temperatura. Visoka začetna temperatura pa je zaradi prezgodnje inicializacije modula RFID. Le ta je bil vstavljen v ribo šele 3 ure kasneje.



Slika 3.7: Test 6 - Temperature okolja in ribe v hladilnici (29 ur), med transportom (2 uri) in pri hranjenju v domačem hladilniku (18 ur).

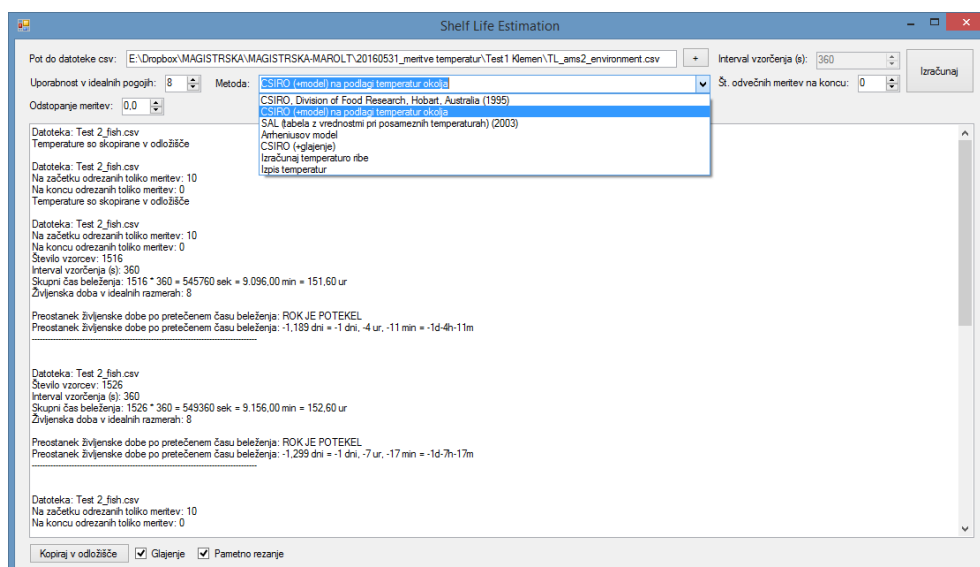
3.2 Napoved preostale dobe uporabnosti

3.2.1 Namizna aplikacija

Za izračun preostale dobe uporabnosti smo razvili namizni program v Visual Studiu s programskim jezikom C#. Program kot vhod prebere temperature

iz datoteke CSV in jih obdela z izbrano metodo.

V programu najprej s pomočjo dialoga za izbiro določimo podatkovno datoteko .csv, ki jo želimo obdelati. Podprta sta dva formata: (i) Originalna datoteka, ki poleg zaporednih števil ter temperatur vsebuje še druge informacije v fazi testiranja; (ii) Testna datoteka je namenjena izračunom in risanju grafov. Vsebuje le meta podatke, zaporedne številke in meritve. Nato je potrebno izbrati metodo s katero želimo obdelati podatke v datoteki (slika 3.8). V nadaljevanju so najprej predstavljene tri možnosti, ki so uporabljene za urejanje podatkov in izračune preostale dobe uporabnosti pri analizi testov hladne verige. Zadnji dve opciji sta namenjeni evalvaciji in testiranju izdelanega modela za dinamično napovedovanja dobe uporabnosti.



Slika 3.8: Namizna aplikacija za operacijski sistem Windows

Izračun preostale dobe uporabnosti se izvede na podlagi izmerjenih temperatur, ki so zapisane v testni datoteki. Na voljo so algoritmi za tri modele: (i) Model CSIRO, (ii) Tabela SAL; (iii) Arrheniusov model.

Izračun preostale dobe uporabnosti z glajenjem. Algoritem najprej zgladi podatke iz testne datoteke, nato pa z modelom CSIRO izračuna preostalo dobo uporabnosti.

Izpis temperatur iz datoteke izmed vseh podatkov v originalni datoteki izlušči zgolj zaporedne številke ter temperature ločene s tabulatorjem in vsako meritev v svoji vrstici. Vrednosti se skopirajo v odložišče in so v takem formatu, da se samo prilepijo v program Excel, kjer potem izdelamo graf.

Pretvorba temperatur okolja v temperature ribe se izvede z uporabo dinamičnega modela, ki smo ga razvili. Postopek je namenjen izpisu vmesnih izračunov za potrebe risanja grafov.

Izračun preostale dobe uporabnosti na podlagi temperatur okolja. Najprej se z razvitim modelom izvede preračun temperatur okolja v temperature ribe, nato pa se s temi podatki izvede izračun preostale dobe uporabnosti z modelom CSIRO.

Poleg izbire metode imamo na voljo še dodatne parametre za urejanje podatkov in izpisov:

- popravilo odstopanja meritev za x °C (T correct),
- nastavitev referenčne dobe uporabnosti,
- rezanje zadnjih n meritev,
- pametno rezanje odreže prvih nekaj nadpovprečnih meritev, ko senzor še ni pravilno nastavljen,
- kopiranje v odložišče za potrebe risanja grafov. Vmesne izračune se kopira v odložišče in potem prilepi v druge programe (npr.: Excel).

Če označimo glajenje, se najprej izvede sprememba temperaturnih podatkov (glajenje) in šele nato izbrana metoda. Glajenje se izvede po metodi uteženega tekočega povprečenja [19]. Uteži smo določili z empiričnim pristopom (tabela 3.3), tako da ne pokvarimo dejanskih temperaturnih sprememb, hkrati pa izločimo šum, ko je temperatura približno konstantna.

0,01	0,02	0,08	0,15	0,46	0,15	0,08	0,03	0,01
------	------	------	------	------	------	------	------	------

Tabela 3.3: Uteži uporabljene za glajenje meritev.

3.2.2 Rezultati

Preostala doba uporabnosti (angl. Shelf Life - SL) je izračunana za vseh šest testov (test 1 - test 6), ki so bili predstavljeni z opisi in grafi (poglavje 3.1). Interval vzorčenja je bil pri vseh testih 6 minut. Referenčna doba uporabnosti (SL_{ref}) pa je določena za idealne razmere hranjenja pri 0 °C in znaša 8 dni. V izvedbi testiranja je bila vključena tudi simulacija referenčnih meritev, kjer naj bi bila temperatura ribe 8 dni enaka 0 °C. Rezultat mora biti ob poteku referenčne dobe uporabnosti enak 0 dni.

Izračuni preostale dobe uporabnosti (v nadaljevanju SL) na podlagi temperatur ribe in okolja so za vse tri modele (CSIRO, Tabela SAL in Arrheniusov model) predstavljeni v tabeli 3.4.

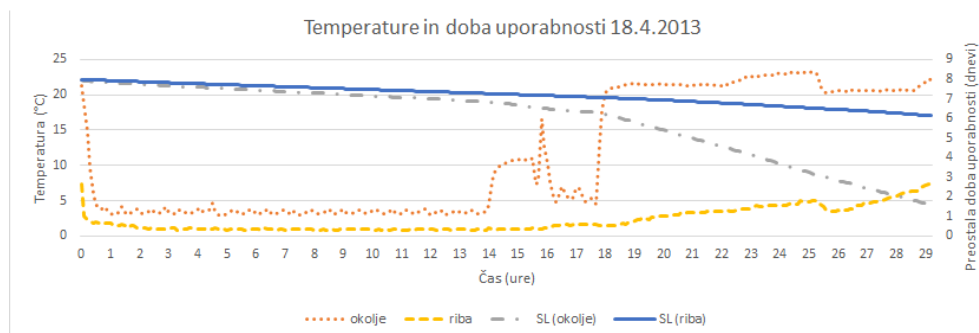
Test in vrsta meritev	Trajanje	CSIRO glajenje	CSIRO	SAL	Arrhenius
0 stopinj	8d	0	0	0	0
Test 1 - Okolje	1d 23h	1d 20h	1d 20h	2d 3h	3d 23h
Test 1 - Riba	1d 23h	5d 18h	5d 18h	5d 17h	5d 22h
Test 2 - Okolje	1d 5h	1d 13h	1d 13h	1d 9h	3d 12h
Test 2 - Riba	1d 5h	6d 3h	6d 3h	6d 0h	6d 11h
Test 3 - Okolje	2d 3h	8h	8h	5h	2d 18h
Test 3 - Riba	2d 3h	4d 19h	4d 19h	4d 10h	5d 8h
Test 4 - Okolje	23h	5d 4h	5d 4h	5d 5h	6d 1h
Test 4 - Riba	23h	6d 14h	6d 15h	6d 14h	6d 19h
Test 5 - Okolje	1d 4h	0	0	-2h	2d 15h
Test 5 - Riba	1d 4h	1d 23h	1d 23h	1d 11h	4d 5h
Test 6 - Okolje	2d	2d 0h	1d 23h	2d 9h	3d 8h
Test 6 - Riba	2d	5d 2h	5d 2h	4d 21h	5d 13h

Tabela 3.4: Izračun preostale dobe uporabnosti: CSIRO (glajenje meritev in dejanske meritve), Tabela SAL in Arrheniusov model.

Pomembne ugotovitve so naslednje:

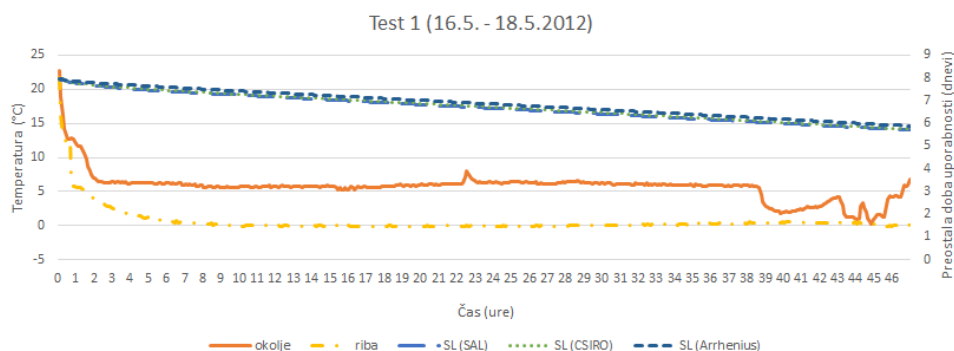
- Med rezultati modela CSIRO z glajenjem in brez glajenja ni razlike, kar pomeni, da so lahko za izračun SL uporabljene izmerjene temperature.
- Primerjava modelov pri testih s temperaturami ribe kaže določena odstopanja (do 22 ur), ki so povezana z njim časom trajanja, fazami shranjevanja in s pristopom za določanje koeficientov v izračunu SL.
- Izračunana SL je za višje, spremenljive temperature okolja, bistveno krajša kot za nizke temperature ribe pri vseh testih.

Če bi se zgodilo, da riba ne bi bila v originalni embalaži (izolirana škatla z ledom), bi bila direktno izpostavljena temperaturi v okolici. Slika 3.9 prikazuje primerjavo izračunane dobe uporabnosti na podlagi temperatur ribe in okolja. Pri testu 2 bi preostala doba uporabnosti ribe izpostavljene visoki temperaturi okolja (20-25 °C) začela po 18 urah strmo padati.

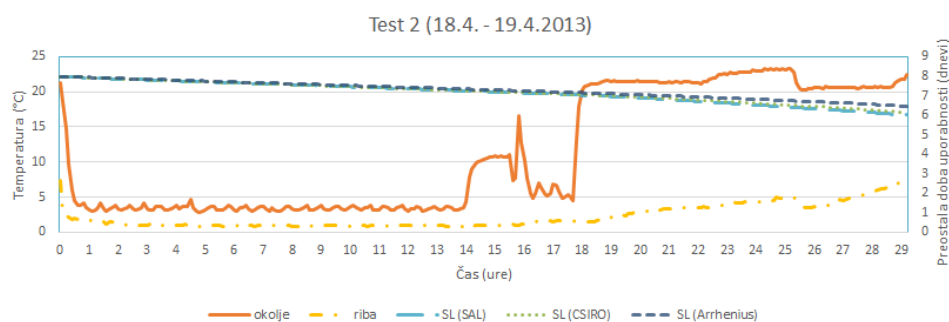


Slika 3.9: Test 2 - Meritve temperatur ribe in okolja in spreminjanje preostale dobe uporabnosti na podlagi temperatur ribe ter okolja z metodo CSIRO.

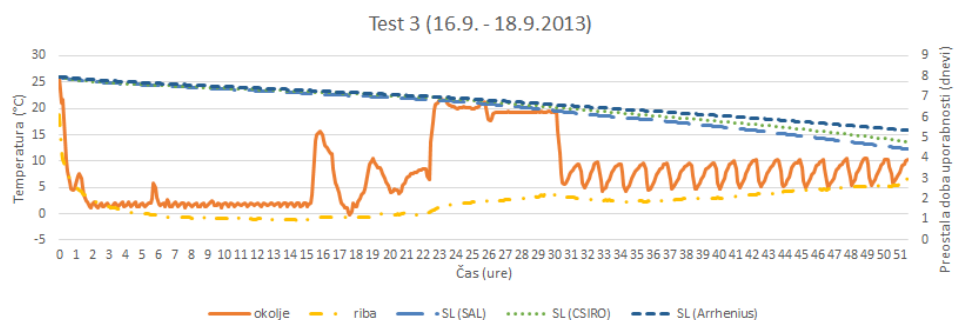
Slike 3.10, 3.11, 3.12, 3.13, 3.14 in 3.15 za vse teste prikazujejo preostalo dobo uporabnosti izračunano z vsemi tremi metodami.



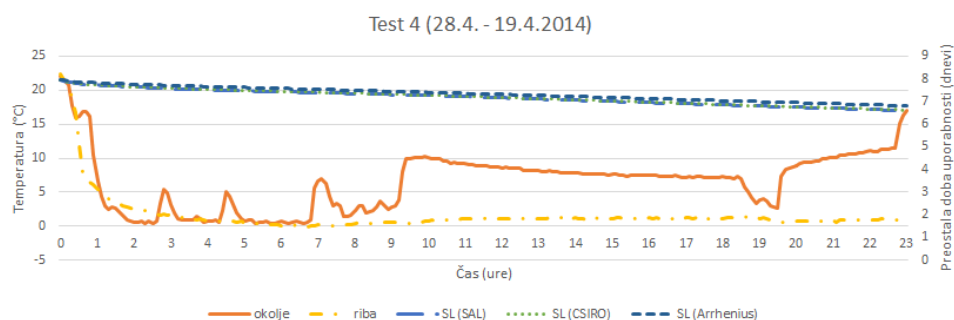
Slika 3.10: Test 1 - Meritve temperatur ribe in okolja in spremembe preostale dobe uporabnosti ribe. Razlike v napovedi modelov so 5 ur.



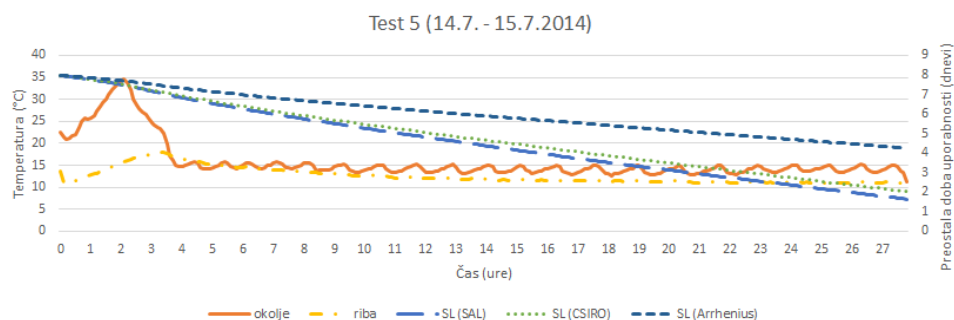
Slika 3.11: Test 2 - Meritve temperatur ribe in okolja in spremembe preostale dobe uporabnosti za vse tri metode. Razlike v napovedi modelov so 11 ur



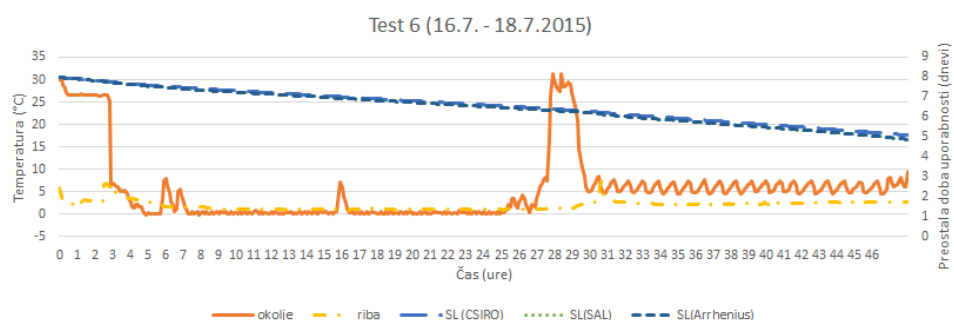
Slika 3.12: Test 3 - Meritve temperatur ribe in okolja in spremembe preostale dobe uporabnosti za vse tri metode. Razlike v napovedi modelov so 22 ur.



Slika 3.13: Test 4 - Meritve temperatur ribe in okolja in spremembe preostale dobe uporabnosti za vse tri metode. Razlike v napovedi modelov so 5 ur.



Slika 3.14: Test 5 - Meritve temperatur ribe in okolja in spremembe preostale dobe uporabnosti za vse tri metode. Razlike v napovedi modelov so 2 dni in 18 ur.



Slika 3.15: Test 6 - Meritve temperatur ribe in okolja in spremembe preostale dobe uporabnosti za vse tri metode. Razlike v napovedi modelov so 16 ur.

Pri testu 5 (slika 3.14) niso bili upoštevani standardi za izvedbo hladne verige, saj paket ni vseboval nobenega hladilnega materiala in ni bil izveden z enakimi fazami v procesu kot drugi. Test sicer odstopa od ostalih, je pa primeren za prikaz spreminjana SL v primeru, da je riba neposredno izpostavljena temperaturi okolja.

Kot je razvidno iz tabele 3.4 smo z vsako metodo dobili različne izračune preostalih dob uporabnosti. Med rezultati metod CSIRO in SAL ni velike razlike. CSIRO uporablja preprosto enačbo odvisno od temperature. Metoda, ki uporablja tabelo SAL pa se zanaša na konstantne vrednosti, ki jih lahko pretvorimo v koeficiente za pokvarljivost živila pri neki temperaturi. Obe metodi sta zelo poenostavljeni, zato ne moremo pričakovati, da bo izračun zelo natančen.

Pri Arrheniusovem modelu na izračun vpliva veliko parametrov, ki izhajajo iz kemijskih zakonitosti in nimamo na voljo natančnih vrednosti. Eden izmed parametrov je tudi aktivacijska energija, ki je drugačna za vsako živilo, vsako bakterijo in je odvisna tudi od temperature. Raziskovalci [6] so imeli pri eksperimentu ves čas konstantno temperaturo in je bila zato aktivacijska energija tudi konstantna. Pri nas pa so pogoji dinamični in je to eden izmed glavnih razlogov za odstopanja. V našem primeru Arrheniusov model ni primeren. To je razvidno tudi iz tabele 3.4, kjer vidimo večja odstopanja od ostalih dveh metod za napovedovanje preostale dobe uporabnosti.

Temperaturni senzor ima natančnost $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ kar se lahko vidi tudi na grafih v razdelku 3.1. Kljub predvideni konstantni temperaturi, črta na grafu ni povsem ravna. Meritve smo zgladili (metoda je opisana v razdelku 3.2), da bi videli, če ima šum kakšen vpliv na izračune. Kot je razvidno iz tabele 3.4 so izračuni (zaokroženi na uro) identični za večino testov. Zaradi zaokroževanja pride pri testih 4 in 6 do razlike ene ure. To podobnost smo pričakovali, saj so zglajene meritve dejansko povprečje sosednjih meritev. Če pa uporabimo meritve brez glajenja se pa enkrat dobo uporabnosti računa po temperaturi, ki je malce višja od realne (ne več kot $1\text{ }^{\circ}\text{C}$), drugič pa malce nižja. V povprečju pa pridemo do enakega rezultata. Tudi če metoda za

izračun koeficientov ni linearna, je razlika pri tako majhnem odstopanju (1 °C) zanemarljiva.

Arrheniusov model upošteva največ faktorjev, ki vplivajo na pokvarljivost živila, kar pomeni, da bi moral biti najbolj natančen. Problem je, da imamo na voljo le temperature, za ostale faktorje pa lahko uporabimo le približne pričakovane vrednosti, kar pa lahko spremeni rezultat. Model je narejen za drugačne razmere in ne predpostavlja hladilnega materiala in vlažnosti, tako da v našem primeru ni uporaben. Model, ki uporablja tabelo SAL z vnaprej definiranimi dobami uporabnosti je zelo primerljiv z metodo CSIRO (povprečno odstopanje je 5 ur) vendar izgubi na točnosti zaradi dodatnega zaokroževanja temperatur. Model CSIRO je definiran z zvezno funkcijo, zagotavlja natančnost izračuna na eno decimalko in je tudi najbolj preprost za implementacijo. Iz predstavljenih rezultatov lahko zaključimo, da je za izdelavo dinamičnega modela najbolj primeren model CSIRO.

3.3 Dinamični model

3.3.1 Definicija

Na podlagi podatkov iz predstavljenih testov (razdelek 3.1.1), smo razvili model, ki določa spreminjanje temperature ribe v odvisnosti od temperature okolja. Opazovali smo podatke o temperaturah ribe in okolja v posameznih fazah (skladiščenje, transport, hranjenje v hladilniku in na sobni temperaturi). Podatke smo zbrali iz temperaturnih podatkov (test 1 - test 4, test 6), tako da smo identificirali posamezno fazo, njeno trajanje (t), povprečno vrednost temperature okolja (T_o), začetno ($T_r(z)$) in končno ($T_r(k)$) temperaturo ribe. Na podlagi tega potem izračunamo spremembo temperature ribe v tej fazi: $\Delta T_r = T_r(k) - T_r(z)$. Za bolj splošno definicijo nas zanima sprememba temperature na uro. Za primer lahko vzamemo test 3, kjer je bila riba vmes 7 ur na povprečni temperaturi 20 °C.

$$t = 7 \text{ h}$$

$$T_o = 20 \text{ °C}$$

$$T_r(z) = 0 \text{ °C}$$

$$T_r(k) = 3,5 \text{ °C}$$

$$\Delta T_r = T_r(k) - T_r(z) = 3,5 \text{ °C} - 0 \text{ °C} = 3,5 \text{ °C}$$

$$\Delta T_r/h = \Delta T_r / t = 3,5 \text{ °C} / 7 \text{ h} = 0,5 \text{ °C/h}$$

V tabeli 3.5 so zapisani rezultati analize za spremembe temperatur ribe v odvisnosti od temperatur okolja glede na proces hladne verige. Za posamezno fazo so podani podatki o njenem trajanju, pripadajočem testu, povprečni temperaturi okolja, spremembi temperature ribe v tem obdobju in izračunana povprečna sprememba temperature ribe na uro.

Ugotovili smo, da je spreminjanje temperature ribe (T_r) odvisno od faze v kateri je. Če je v nekem obdobju temperatura okolja (T_o) manj kot 5 °C, lahko rečemo, da se T_r ne spreminja. V temperaturnem razmaku med 5 °C in 10 °C se je T_r v povprečju dvigovala za 0,069 °C/h. Pri $T_o \geq 20^\circ\text{C}$ pa

se T_r povečuje za 0,5 °C/h. Model smo s temi vrednostmi testirali na vseh testih in z empiričnim pristopom prilagodili vrednosti, tako da se rezultati (izračunana T_r) prilegajo vsem primerom.

Test	Faza	t(h)	$T_o(^{\circ}\text{C})$	$\Delta T_r(^{\circ}\text{C})$	$\Delta T_r/h (^{\circ}\text{C}/\text{h})$
3	Hladilnica	14	2	0	0
2	Hladilnica	14	4	0	0
6	Hladilnik	18	6,5	0,55	0,03
3	Hladilnik	22	7,5	1,8	0,08
4	Hladilnica	9	8	0,7	0,078
2	Transport	4	10	0,35	0,0875
3	Transport	7	20	3,5	0,5
2	Soba	10	22	5	0,5

Tabela 3.5: Spremembe temperature ribe v odvisnosti od temperature okolja.

Končni model za posamezne temperaturne okvirje je predstavljen v tabeli 3.6. Pri T_o nižjih od 5 °C se T_r ne spreminja. Pri T_o med 5 °C in 10 °C se T_r vsako uro dvigne za 0,075 °C. Za T_o večje od 18 °C smo opazili, da imajo višje temperature večji vpliv na spremembo T_r zato smo ΔT_r definirali dinamično glede na T_o . Pri $T_o = 22$ °C je $\Delta T_{ribe}/h = 0,5$ °C. Kar pomeni, da bo z vsako stopinjo celzija ΔT_r večja za 0,023 °C ($22 / 0,5 = 0,023$). Pri standarnem procesu hladne verige se temperature med 10 °C in 18 °C ne pojavljajo pogosto. Zaradi prehodov med fazami moramo imeti podane tudi te vrednosti. Za ta temperaturni okvir smo za $\Delta T_r/h$ izbrali srednjo vrednost med 20 °C in 10 °C, kar je +0,25 °C/h.

Kot izhodiščno temperaturo živila izračunano z modelom (T_m) smo predpostavili 0 °C. Program gre čez vse meritve okolja in za vsako meritev T_i preveri v kateri temperaturni okvir iz tabele 3.6 spada. V tabeli je predstavljena ΔT_r v eni uri, zato se za povečanje T_m uporabi le delež te vrednosti glede na interval meritev. Pri 6 minutnem intervalu in $\Delta T_r/h = 0,075$ °C se T_m poveča za 0,0075 °C ($0,075 \times 6 / 60$).

Temperaturni okvir (°C)	$\Delta T_r/h$ (°C/h)
< 5	0
5 do 10	+0,075
10,01 do 18	+0,25
> 18	+ ($T_o \times 0,023$)

Tabela 3.6: Model za spreminjanje temperature ribe v odvisnosti od temperature okolja.

3.3.2 Napoved preostale dobe uporabnosti

Z razvitim namiznim programom smo model testirali na podatkih iz petih predstavljenih testov. Test 5 ni bil primeren za razvoj in testiranje modela, saj ni ustrezal standardni izvedbi hladne verige, zato v nadaljevanju ni predstavljen. Primer odzivanja modela na temperature okolja je za test 1 - test 4 in test 6 predstavljen na slikah 3.16, 3.17, 3.18, 3.19 in 3.20.

Razvit model najprej pretvori temperature okolja v temperature ribe, nato se s temi temperaturami izračuna preostalo dobo uporabnosti. Funkcija za pretvorbo T_o v T_r na vhodu prejme seznam T_o (**temp**) in je definirana kot:

```

StMertevev = 10; //stevilo meritev v eni uri
List Tr;      //temperature ribe
Tr.Add(0);
for (int i = 1; i < temp.Count; i++):
    var To = temp[i];      //temperatura okolja
    if (To >= 5 && To <= 10):
        Tr.Add(Tr[i - 1] + 0.075 / StMertevev);
    else if (To > 10 && To <= 18):
        Tr.Add(Tr[i - 1] + 0.25 / StMertevev);
    else if (To > 18):
        Tr.Add(Tr[i - 1] + To * 0.0227 / StMertevev);
    else:
        Tr.Add(Tr[i - 1]);
return tempRibe;

```

Za napovedovanje dobe uporabnosti je uporabljena metoda CSIRO, ki je definirana kot funkcija, ki sprejme seznam temperatur ribe, referenčno dobo uporabnosti SL_{ref} in interval beleženja temperatur, vrne pa preostalo dobo uporabnosti. Funkcija je definirana kot:

```
function CSIRO(temperature , SLref , interval):
    var SL = SLref
    for(i = 0; i < temperature.length; i++):
        var k = Power((1 + temperature[i] * 0.1), 2);
        SL -= k * interval;
    return SL;
```

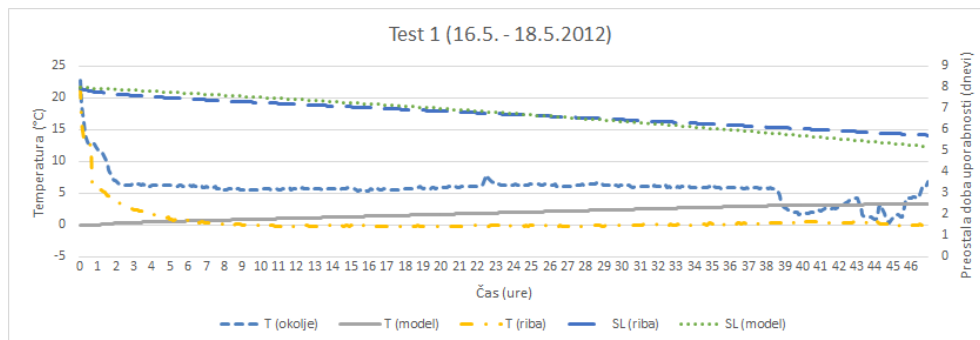
V nadaljevanju so na garfih so predstavljene temperature ribe (T (riba)), temperature okolja (T (okolje)), z modelom izračunane temperature ribe (T (model)), preostala doba uporabnosti izračunana iz izmerjenih temperatur ribe (SL (riba)) in preostala doba uporabnosti ribe z uporabo dinamičnega modela in izmerjenih temperatur okolja (SL (model)). Rezultati izračunov preostale dobe uporabnosti so predstavljeni v tabeli 3.7.

Test	SL (riba)	SL (model)
Test 1	5d 18h	5d 5h
Test 2	6d 3h	6d 10h
Test 3	4d 19h	4d 15h
Test 4	6d 15h	6d 23h
Test 6	5d 2h	5d 1h

Tabela 3.7: Izračuni preostalih dob uporabnosti na podlagi razvitega modela in temperatur rib.

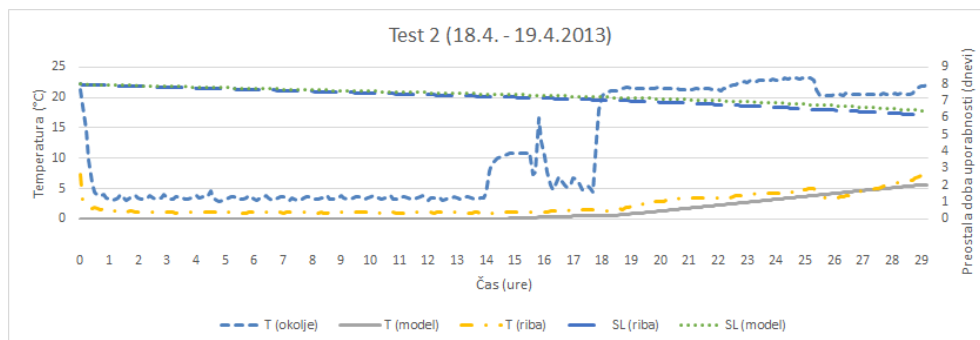
Test 1. T_o je večino časa konstantna in se giblje malo nad 5 °C. Model v takih pogojih predpostavlja počasno rast temperature ribe in se tako po 47 urah izračunana temperatura povzpne na 3 °C. Izmerjena T(riba) je ves čas okoli 0 °C. Zaradi te razlike se tudi izračuna dobe uporabnosti na podlagi

meritev in modela razlikujeta .



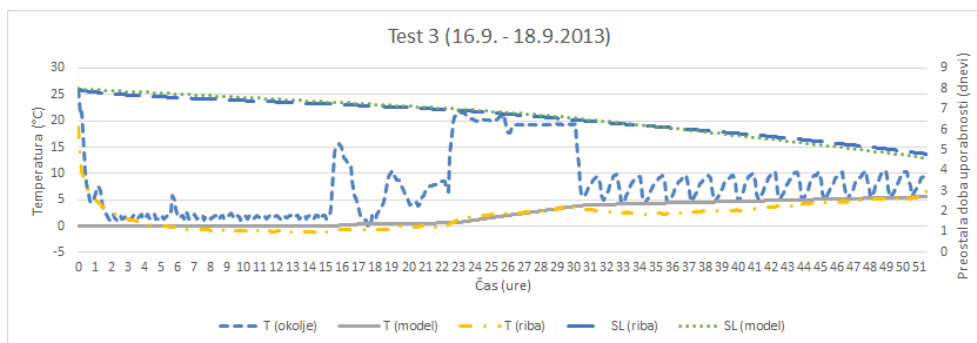
Slika 3.16: Test 1 - Izmerjene temperature ribe so nižje od izračunanih. Razlika v izračunu SL je 13 ur.

Test 2. Izračunana temperatura ribe je v prvi polovici ves čas nižja od izmerjene, saj model predpostavlja začetno temperaturo 0 °C. Proti koncu se temperaturi izenačita. Ob rahlem spustu T_o v 16. uri se za kratek čas zniža tudi T(riba). Naš model takih kratkih temperaturnih sprememb ne zazna.



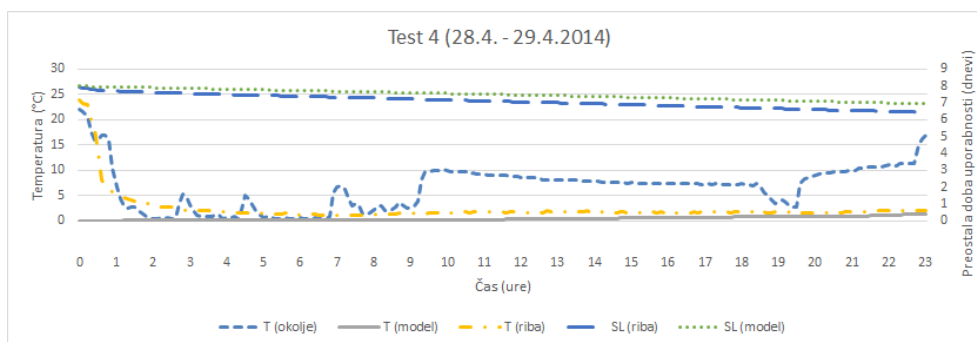
Slika 3.17: Test 2 - Izračunane temperature ribe so večino časa malo nižje od izmerjenih. Razlika v izračunu SL je 7 ur.

Test 3. Pri preskoku T_o iz visoke na nizko temperaturo se začne $T(\text{riba})$ nižati. Razlog za to je hladilni material (led), ki obdaja ribo. Naš model tega sicer ne predvideva, vendar na koncu pride do zelo podobnih rezultatov.



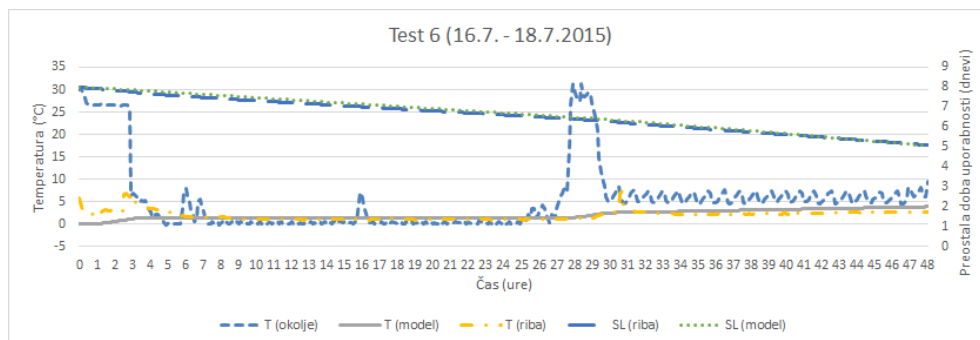
Slika 3.18: Test 3 - Izračunane temperature so ves čas zelo podobne izmerjenim. Posledično je tudi razlika v izračunu SL manj kot 4 ure.

Test 4. Izračunana temperatura ribe se začne pri 0°C in se počasi približuje izmerjeni vendar je ves čas nižja. Zaradi tega je tudi doba uporabnosti na podlagi modela ($SL(\text{model})$) za 0,25 dneva daljša od dobe uporabnosti na podlagi temperatur ribe ($SL(\text{riba})$).



Slika 3.19: Test 4 - Izračunana temperatura je ves čas nižja od izmerjene. Na koncu je razlika v izračunu SL 8 ur.

Test 6. Izračunane in izmerjene temperature so si zelo podobne. Posledično tudi preostala doba uporabnosti.



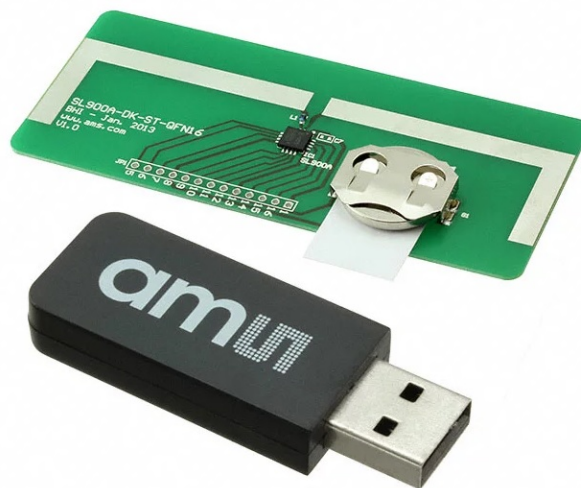
Slika 3.20: Test 6 - Izračunane temperature se dobro prilagajajo izmerjenim. Izračuna SL se na koncu razlikujeta samo za 1 uro.

Poglavje 4

Implementacija

4.1 Modul SL900A

Modul SL900A [20] (slika 4.1) vsebuje čip skladen s standardom "EPC Gen2 Class 3" [21], temperaturni senzor, pomnilnik EEPROM in dodatni vir napajanja (baterijski vložek). Če želimo shranjevati meritve, čip potrebuje baterijsko napajanje, branje pa lahko izvajamo tudi samo s pomočjo elektromagnetnih valov iz čitalca RFID.



Slika 4.1: Modul SL900A s priloženim ključkom USB na katerem je vsa potrebna dokumentacija [22].

Glavne lastnosti modula so:

- Visok temperaturni razpon delovanja: -40 °C do +125 °C
- Frekvenca: 860 do 960 MHz
- Delovanje kot pasivna in aktivna značka
- Baterijsko napajanje: 1.5V ali 3V
- Različni načini beleženja temperatur z različnimi senzorji
- Možnost beleženja temperatur z uporabo:
 - Integriranega senzorja
 - Dveh zunanjih senzorjev
- Pomnilnik EEPROM velikosti 9kb, omogoča hranjenje 841 meritev
- Hranjenje do 841 meritev
- Integriran dinamičen izračun dobe uporabnosti

Temperaturni senzor, lahko zazna temperature na območju od -20 – 60 °C z natančnostjo ± 1 °C. Celotno območje, ki ga lahko senzor zazna je od -40 °C do +125 °C, vendar je pri tem natančnost manjša.

Modul ima integriran 10 bitni analogno digitalni pretvornik. Uporablja se za pretvorbo temperatur in napetosti baterije v digitalni zapis. Z 10 biti lahko zapišemo 1024 različnih vrednosti. Dve sosednji vrednosti se razlikujeta za 0,18 °C, odmik pa je -89,3 °C. S tem dosežemo temperaturni razpon meritev od -89,3 °C do +94,6 °C. Temperatura se iz 10 bitne vrednosti izračuna z enačbo $T(^{\circ}\text{C}) = koda \times 0,18^{\circ}\text{C} - 89,3^{\circ}\text{C}$, kjer je *koda* 10 bitni zapis temperature pretvorjen v desetiško številko med 0 in 1023.

Za vsakega od treh delov pomnilnika je omogočena zaščita z geslom. Vsako geslo je sestavljeno iz 32 bitov in je razdeljeno na dva 16-bitna dela. Prvi del je za zaščito pred branjem in pisanjem drugi del pa samo za zaščito pred pisanjem.

Implementiran je algoritem za dinamični izračun preostale dobe uporabnosti živil. Ko doba uporabnosti poteče je možno sprožiti alarm z aktivacijo lučke na vezju ali pa s sprožitvijo prekinitve na zunanjem mikrokrmilniku.

4.1.1 Pomnilnik in beleženje temperatur

Čip SL900A ima integriran EEPROM velikosti 9kb in je razdeljen v 5 pomnilniških bank (tabela 4.1). Dostop do pomnilnika je izveden tako, da se pri naslavljanju navede številko banke in relativni naslov znotraj banke.

Pomnilniška banka	Velikost banke (v bitih)	Namen
SYSTEM	512	Sistemske parametri (kalibracija in beleženje temperatur)
RESERVED	64	Gesla
EPC	144	Vrednosti PC in EPC
TID	80	Unikatna identifikacija
USER	8416	Uporabniški podatki in meritve

Tabela 4.1: Pomnilnik je razdeljen na 5 delov - pomnilniških bank. Meritve temperature so shranjene v uporabniškem delu (USER), ostale banke pa vsebujejo sistemske podatke.

Temperature so v pomnilniku predstavljene z 10 biti. Primer pomnilniške slike je prikazan na sliki 4.2.

	Bits															
Block #	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
0x00	Temp. 1										Temp. 2					
0x01	Temp. 2				Temp. 3										Temp. 4	
0x02	Temp. 4								Temp. 5							
0x03	Temp. 5		Temp. 6										Temp. 7			
0x04	Temp. 7						Temp. 8									

Slika 4.2: Uporabniški pomnilnik s shranjenimi meritvami. Posamezna meritev je predstavljena z 10 biti [20].

Čip podpira 6 različnih načinov beleženja temperatur. Ti so opisani v

tabeli 4.2. V primeru, ko se cel pomnilnik zapolni z meritvami, obstajata dve pravili hranjenja meritev. V cikličnem načinu se meritve še naprej shranjujejo tako, da povozijo najstarejše meritve. V normalnem načinu pa se ob polnem uporabniškem pomnilniku preneha shranjevanje meritev. V obeh primerih se še naprej povečuje števec meritev.

Bit 2	Bit 1	Bit0	Način
0	0	0	Zaporedne meritve
0	0	1	Izven meja
0	1	1	Samo na mejah
1	0	1	Ob prekinitvi 1
1	1	0	Ob prekinitvi 2
1	1	1	Ob prekinitvi 1 in 2

Tabela 4.2: Načini beleženja temperatur in pripadajoča koda.

4.1.2 Ukazi in napake

Ukazi so definirani z 8-bitno kodo in imajo omejitve v katerem stanju se lahko izvedejo. Ko čip dobi ukaz, ga obdela in vedno pošlje odgovor. V primeru napake vrne ustrezno kodo. Definirane napake so predstavljene v tabeli 4.3.

Koda napake	Napaka
00000000	Druga napaka
00000011	Lokacija v pomnilniku ne obstaja
00000100	Lokacija v pomnilniku je zaklenjena
00001011	Značka ima premalo napetosti za pisanje
10100000	Napačno geslo
10100010	Napaka pri meritvi napetosti baterije
10100011	Ukaz ni dovoljen
10100110	EEPROM je zaseden

Tabela 4.3: Seznam napak do katerih lahko pride med izvedbo ukazov.

Čip podpira standardne ukaze za pisanje in branje iz značk RFID. Poleg teh podpira tudi ukaze po meri, ki so specifični za čip s temperaturnim senzorjem. Tak ukaz je na primer **Start Log**. Struktura ukaza je predstavljena v tabeli 4.4. Na začetku je 8 bitov, ki predstavljajo, da gre za ukaz po meri, naslednjih 8 bitov predstavlja ukaz, ki se mora izvesti. Začetek beleženja je razdeljen na 6 delov, tako kot prikazuje tabela 4.5. Sledi 16 bitov za rokovanje in koda CRC (angl. Cyclic Redundancy Check), ki služi zaznavanju napak pri komunikaciji med čitalcem in značko RFID.

Predpona	Koda ukaza	Začetek beleženja	Rokovanje	CRC
0xE0 (8 bitov)	0xA7 (8 bitov)	32 bitov	16 bitov	16 bitov

Tabela 4.4: Struktura ukaza **Start Log**.

Biti	31 ... 26	25 ... 22	21 ... 17	16 ... 12	11 ... 6	5 ... 0
Podatek	Leto	Mesec	Dan	Ura	Minute	Sekunde

Tabela 4.5: Struktura zapisa začetnega časa beleženja.

4.2 Čitalec RFID

4.2.1 NordicID Morphic

Za branje modula SL900A smo uporabljali mobilni čitalec RFID razvit v podjetju NordicID (slika 4.3). Na voljo smo imeli model Morphic [23], ki omogoča RFID komunikacijo, povezljivost z brezžičnim omrežjem, bluetooth povezavo in GPS (angl. Global Positioning System) lociranje. Čitalec omogoča tudi povezavo z mobilnim internetom z uporabo kartice SIM. Podatke je mogoče shraniti tudi na zunanjo kartico SD.



Slika 4.3: Naprava NordicID Morpheic [23].

Programske knjižnice za delo z moduli

Proizvajalec naprave ponuja za interakcijo z napravo različne programske knjižnice. Na voljo so knjižnice za Microsoftovo ogrodje .NET, programski jezik C/C++, Java in skriptni jezik Java Script v kombinaciji z Internet Explorerjem. Večji del naše aplikacije je narejen z uporabo knjižnice MHL (angl. Multiple Hardware Layers), ki je bila razvita leta 2008. Ta ima večino ukazov za komunikacijo z značko RFID že sprogramiranih. Kasneje so razvili še knjižnico Nur, ki dodatno podpira še novejša module njihovih čitalcev.

Eden izmed modulov, ki ga podpira Nur je pošiljanje ukazov po meri. Pri naši aplikaciji in temperaturnih zapisovalnikih potrebujemo te ukaze za kontroliranje beleženja temperatur. Najbolj osnovni ukazi so za začetek in konec beleženja ter preverjanje statusa zapisovalnika.

Od proizvajalca smo dobili informacijo, da naša naprava ne vsebuje modula za pošiljanje ukazov po meri, zato razvita aplikacija nima možnosti pošiljanja kontrolnih podatkov za delovanje modula SL900A.

MHL

Knjižnica MHL ponuja nekaj osnovnih metod za pisanje in branje iz značke RFID. Te so definirane v razredu MHL, tako da moramo najprej inicializirati objekt:

```
MHL mhl = new MHL();
```

Za uporabo modula RFID je potrebno najprej odpreti gonilnik RFID (po koncu uporabe pa tudi zapreti):

```
int mhlDrv = mhl.OpenDrv("RFID");  
...  
mhl.CloseDrv(mhlDrv);
```

Metoda za odpiranje gonilnika vrne oznako modula, ki jo moramo pri ukazih za branje in pisanje podati, zato smo jo shranili v spremenljivko `mhlDrv`. Za branje z značke so ukazi s predpono **Get**, za pisanje pa ukazi s predpono **Set**. Ukazi za branje sprejmejo 2 parametra: oznako modula in ime ukaza za izvedbo. Ukazi za pisanje pa še dodatni parameter z vrednostjo, ki jo želimo zapisati. Obstajajo naslednji ukazi za pisanje in branje:

```
mhl.SetBin(int handle, string name, byte[] value);  
mhl.SetBool(int handle, string name, bool value);  
mhl.SetDword(int handle, string name, uint value);  
mhl.SetInt(int handle, string name, int value);  
mhl.SetString(int handle, string name, string value);  
  
mhl.GetBin(int handle, string name);  
mhl.GetBool(int handle, string name);  
mhl.GetDword(int handle, string name);  
mhl.GetInt(int handle, string name);  
mhl.GetString(int handle, string name);
```

V naslednjem koraku moramo nastaviti tip značk, ki jih bo čitalec bral. To naredimo z ukazom

```
mhl.SetString(mhlDrv, "RFID.TagType", "EPC C1G2");
```

Podatke iz značke preberemo tako, da najprej nastavimo koliko bajtov bomo prebrali, del pomnilnika (banko) iz katerega želimo brati, nato pa nastavimo še opcijo za zaščito z geslom. Nastavili smo branje blokov v velikosti 64B iz uporabniškega dela pomnilnika (banka številka 3) brez gesla. Potem

z zanko beremo dokler ne dobimo napake, ki predstavlja konec pomnilnika. V vsaki iteraciji zanke nastavimo kazalec, ki kaže na začetni naslov bloka, ki ga želimo prebrati. Podatke dobimo v binarni obliki, zato jih je potrebno pred uporabo še pretvoriti. To stori metoda `ObdelajPodatke`.

```
mhl.SetDword(mhlDrv, "RFID.BlockCount", 64);
mhl.SetDword(mhlDrv, "RFID.EPCC1G2.Bank", 3);
mhl.SetBool(mhlDrv, "RFID.EPCC1G2.Secured", false);
for(int i = 0; i < 17; i++)
mhl.SetDword(mhlDrv, "RFID.BlockPointer", 64*i);
data = mhl.GetBin(mhlDrv, "RFID.EPCC1G2.Read");
error = mhl.GetLastError();
if(error == 30007) //konec pomnilnika
    break;
ObdelajPodatke(data);
```

Nur

Knjižnica Nur je bila razvita kasneje kot MHL in je tudi enostavnejša za uporabo. Namesto zapisovanja potrebnih nastavitev z več vrsticami je tukaj mogoče enako storiti zgolj s klicem prave metode, nastavitve pa so podane kot parametri funkcije. Prednost tega je tudi to, da nam ni potrebno iskati katere nastavitve moramo nastaviti in kakšno ime imajo. Tako preprosto najdemo metodo, ki jo želimo izvesti, potem pa Visual Studio sam predlaga katere podatke moramo posredovati ob klicu metode.

Tudi tukaj je potrebno inicializirati objekt in povezavo z ustreznim modulom.

```
NurApi hNur = new NurApi(this);
hNur.ConnectIntegratedReader();
```

Prisotnost vseh značk RFID v okolici lahko pregledamo s klicem ene metode, ki pregleda okolico in druge metode, ki vrne tabelo značk.

```
resp = hNur.Inventory();
storage = hNur.FetchTags(true);
```

Čez tabelo se lahko iterira z zanko in se po želji obdela najdene značke. Oznako EPC lahko pridobimo z metodo `GetEpcString`.

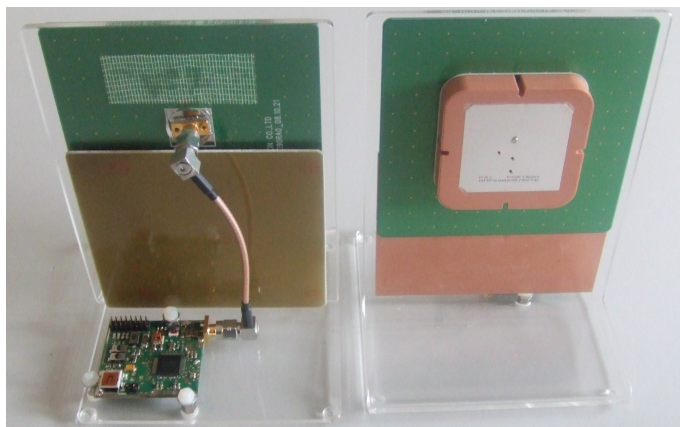
```
for (int i = 0; i < resp.numTagsFound; i++)  
{  
    string EPC = storage[i].GetEpcString();  
}
```

Oznako EPC lahko nastavimo preko objekta, ki smo ga dobili med iskanjem okoliških značk. Niz, ki ga želimo nastaviti kot EPC, moramo najprej pretvoriti v binarno obliko, nato pa ga nastavimo kot EPC.

```
SL900ATag tag = new SL900ATag(storage[0]);  
string EPC = "12341234";  
byte[] bytes = NurApi.HexStringToBin(str);  
tag.WriteEPC(0, false, bytes);
```

4.2.2 Fiksni čitalec

Z mobilnim čitalcem ni možno izvajati kontrolnih funkcij modula SL900A (Inicializacija, Start in Stop zapisovanja, drugi parametri), zato smo potrebovali še fiksni čitalec IDS (slika 4.4), ki je bil preko vodila USB priklopljen na računalnik.



Slika 4.4: Fiksni čitalec RFID IDS [24].

Čitalec IDS sestoji iz čipa UHF (angl. Ultra High Frequency), zunanjega radiofrekvenčnega ojačevalca, mikrokontrolerja PIC in vmesnika USB. Ogrodje prototipa je narejeno iz plastike in vsebuje anteno obdano z keramiko. Čitalec podpira protokol EPC Gen2 [21], tako da smo lahko z njim komunicirali z vsemi našimi temperaturnimi zapisovalniki preko tehnologije RFID. V komplet s čitalcem spada tudi programska oprema za osebni računalnik, ki omogoča popoln nadzor nad temperaturnimi zapisovalniki. Nekatere izmed glavnih funkcij, ki jih program omogoča so:

- branje in spreminjanje kode EPC,
- upravljanje z registri pomnilnika,
- iskanje značk RFID v bližini,
- upravljanje lastnosti čitalca (frekvenca, moč antene, kodiranje, ...),
- testiranje značk s pošiljanjem ukazov po meri,
- upravljanje zapisovalnikov temperatur [24].

Program vse izvedene operacije in prejete odgovore s strani temperaturnega zapisovalnika sproti izpisuje na zaslon. Tako uporabnik vidi, če pride do neuspešne izvedbe operacije [24]. Na voljo ima tudi vse operacije povezane z beleženjem temperatur:

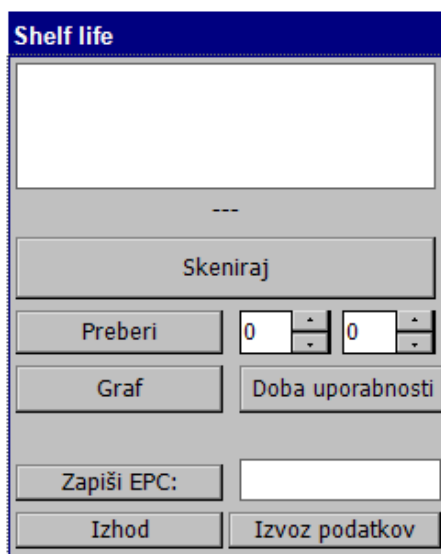
- zaščita pomnilnika s temperaturami z geslom,
- nastavitev načina beleženja temperatur,
- nastavitev temperaturnega območja beleženja,
- interval beleženja,
- branje vseh nastavitev z značke,
- začetek in konec beleženja z možnostjo časovnega zamika,
- branje temperaturnih podatkov in izris grafa,
- izvoz temperaturnih podatkov v datoteko [24].

4.3 Mobilna aplikacija - doba uporabnosti

S programskim jezikom C# smo razvili mobilno aplikacijo za napravo NordinID Morhic na kateri je nameščen Windows CE 6.0. Za pravilno delovanje aplikacij mora biti na napravi nameščeno Microsoftovo ogrodje .NET.

Osnovni pogled mobilne aplikacije je prikazan na sliki 4.5. Omogoča naslednje funkcionalnosti:

- skeniranje značk RFID (Skeniraj),
- branje temperaturnih podatkov (Preberi),
- prikaz statističnih podatkov (Doba uporabnosti),
- izris temperaturnega grafa (Graf),
- izračun preostale dobe uporabnosti (Doba uporabnosti),
- zapis splošnega identifikatorja (Zapiši EPC),
- izvoz podatkov (Izvoz podatkov).



Slika 4.5: Osnovni pogled v mobilni aplikaciji.

Skeniranje značk RFID opravimo z gumbom "Skeniraj". Aplikacija poišče vse značke RFID v bližini in jih izpiše na seznamu na vrhu. Pod

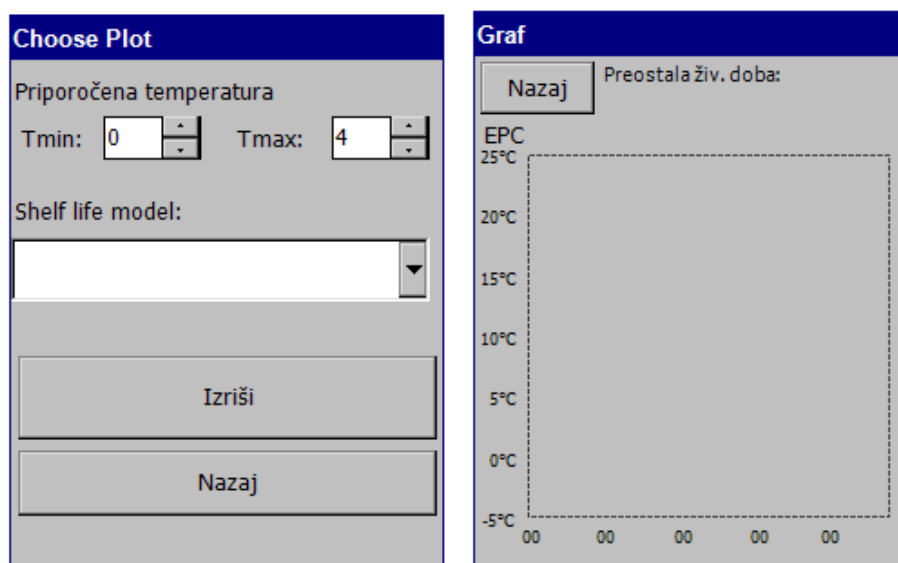
ikono je zapisana enolična oznaka značke - EPC.

Branje temperaturnih podatkov izvedemo z gumbom "Preberi" potem, ko izberemo s katere značke želimo brati. Aplikacija začne branje iz uporabniškega dela pomnilnika in pri tem naenkrat prenese 64 blokov podatkov, kar je enako 64 bajtov oz. 512 bitov. Branje se izvaja, dokler ne pridemo do konca pomnilnika. Vse prenesene bite (8416) se nato pretvori tako, da 10 bitov predstavlja eno meritev.

Ko se transport zaključi, bo SL900A še naprej beležil temperature, dokler ne bo zaseden pomnilnik ali pa ga ustavimo s fiksnim čitalcem. Posledično zadnje temperature ne bodo relevantne, saj bodo po vsej verjetnosti prikazovale sobno temperaturo, kjer bo odložen senzor. Desno od gumba "Preberi" se zato nahajata polji za vnos časa zaključka beleženja (ura in minute). Aplikacija pozna interval beleženja in kdaj se je beleženje začelo. Tako lahko izračuna koliko meritev je relevantnih in vse odvečne odreže. Problematične so tudi temperature na začetku, ko se meritve že beležijo, čeprav modul še ni nameščen. Algoritem zazna prvih nekaj nadpovprečno visokih temperatur in jih odstrani. Vse preostale meritve se na koncu shranijo tudi v začasno datoteko, zato da jih lahko aplikacija kasneje obdeluje brez ponovnega branja iz značke.

Graf. Za izris grafa je potrebno v prvem koraku (slika 4.6 levo) izbrati priporočeno temperaturo (T_{min}, T_{max}) hranjenja za določeno živilo. Če je temperatura živila znotraj priporočenega območja, je temperaturna črta takrat obarvana zeleno v nasprotnem primeru pa rdeče. Na izbiro pa je tudi model s katerim naj se izračuna preostala doba uporabnosti. Privzet je model CSIRO, ki predpostavlja, da so meritve temperature okolja. Z modelom se te temperature preračunajo v temperature živila in nato se izračuna preostala doba uporabnosti.

Slika 4.6 (desno) prikazuje okno za risanje grafa in izračun preostale dobe uporabnosti. Prikaže se tudi koda EPC značke iz katere so bile prebrane temperature. Izris grafa je skrčen na širino 200px, tako da je prikazana

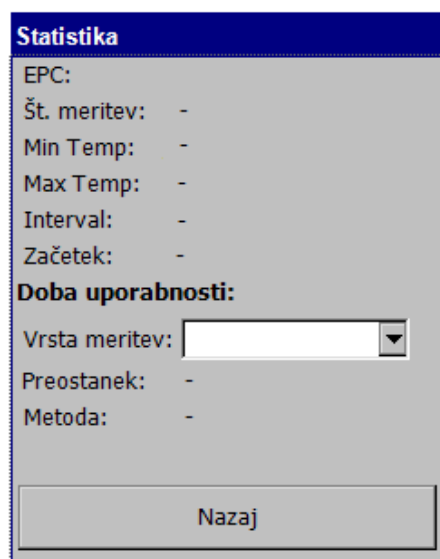


Slika 4.6: Izbira vrednosti za izris grafa in izračun preostale dobe uporabnosti (levo). Pogled za izris temperaturnega grafa in izpis preostale dobe uporabnosti (desno).

vsaka n -ta meritev, kjer je $n = (\text{število meritev} / 200) + 1$.

Statistični podatki Pri pregledu statističnih podatkov (slika 4.7) je mogoče razbrati EPC temperaturnega zapisovalnika, število meritev, najmanjšo ter največjo izmerjeno temperaturo, interval in začetek beleženja. Število meritev je končno, z že odrezanimi začetnimi in končnimi meritvami. Na izbiro imamo tudi vrsto meritev. Če izberemo "Okolje" se bodo temperature najprej na podlagi modela preračunale v temperature ribe, nato pa se bo izračunala preostala doba uporabnosti. Če izberemo "Riba" se bo preostala doba uporabnosti izračunala direktno iz teh temperatur.

Zapis EPC. Zaradi lažjega sledenja aplikacija omogoča tudi spremembo EPC (Electronic Product Code) identifikacijske oznake temperaturnega senzorja RFID. To storimo tako, da v polje vpišemo željeno EPC oznako in pritisnemo »Zapiši EPC«. Pred tem mora biti zgoraj na seznamu označena značka RFID, kateri želimo zamenjati EPC. Le ta pa mora biti tudi v dosegu



Slika 4.7: Statistični podatki o meritvah.

čitalca, da lahko zapiše nov EPC.

Izvoz podatkov je funkcija, ki omogoča, da se prebrani podatki iz modula SL900A shranijo v datoteko. Tako lahko do njih dostopamo tudi, ko čipa nimamo v bližini, datoteko pa prenesemo na računalnik in jo tam poljubno obdelujemo. V prvih dveh vrsticah datoteke je shranjen identifikator značke in preostala doba uporabnosti (v dnevih), ki je bila izračunana z razvitim modelom na podlagi temperatur okolja in metode CSIRO. V nadaljevanju pa so zabeležene meritve. V vsaki vrstici je zaporedna številka meritve in izmerjena temperatura. Datoteka se shrani na kartico SD do katere lahko enostavno dostopamo iz računalnika. Primer datoteke:

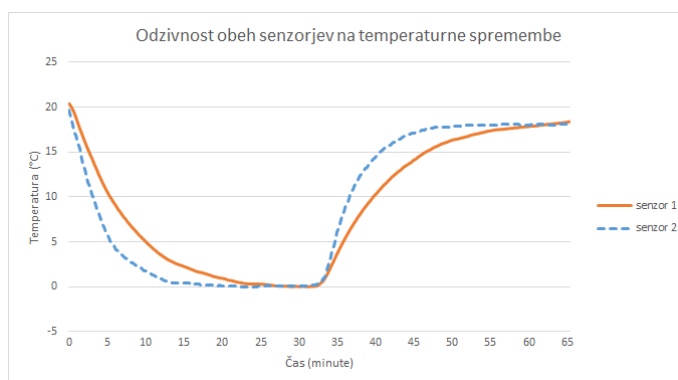
```
UI,12341234
shelf_life ,2.5
0,23.02
1,22.48
2,21,94
:
```

4.4 Merjenje temperatur

Pred izvedbo eksperimenta smo izvedli testiranje sistema in delovanje modulov SL900A. To zajema inicializacijo zapisovalnikov temperatur s čitalcem IDS, beleženje temperatur, branje in obdelavo zabeleženih meritev. Hkrati pa smo želeli ugotoviti odzivnost temperaturnih senzorjev na spremembe temperature okolja. Primerjali smo 2 modula za merjenje in beleženje temperatur. SL900A (senzor 1) in IDS (senzor 2). Za preizkus senzorjev smo najprej naredili nekaj testnih meritev in opazovali, kako se odzivata oba senzorja.

V prvem poskusu sta bila oba modula sprva na sobni temperaturi, potem sta bila postavljena na zunanjo temperaturo (približno 0 °C) in po slabih 35 minutah nazaj na sobno temperaturo. Ves čas sta bila postavljena na stiroporasti površini. Interval beleženja je bil 10 sekund.

Slika 4.8 prikazuje zabeležene temperature obeh senzorjev. Iz grafa je mogoče razbrati, da senzor 2 hitreje zazna temperaturno spremembo. Zabeležene temperature na senzorju 2 imajo odstopanje za +2 °C zato so vse meritve s senzorjem 2 popravljene za -2 °C.



Slika 4.8: Poskus 1 - Senzor potrebuje 15-25 minut, da zazna spremenjeno temperaturo. Senzor 2 hitreje zaznava temperaturne spremembe.

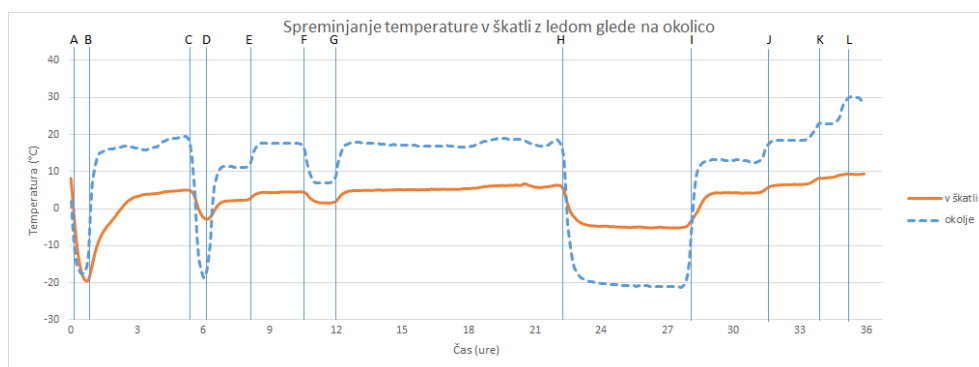
Odzivnost obeh senzorjev je precej slaba, saj je za zaznavo spremembe temperature za 20 °C potrebnih 15-25 minut kljub temu, da senzorja nista

imela nobene izolacije. Enak poskus smo napravili s senzorjema v škatli in ugotovili, da le ta deluje izolativno. Zabeležena temperatura je prišla na 0 °C po približno 30 minutah.

Pri drugem poskusu smo uporabili škatlo napolnjeno z ledenimi kockami. Poskus je trajal 36 ur in vsebuje tako meritve temperatur v škatli kot tudi okolja. Senzor 1 je bil v škatli, senzor 2 pa na škatli. Oba senzorja sta imela nastavljen način beleženja temperatur kot zaporedne meritve (Dense), interval beleženja pa je bil 6 minut.

S tem poskusom smo želeli preveriti odzivanje notranjega senzorja v odvisnosti od zunanjih sprememb temperature. Škatla je bila na začetku v skrinji, kjer je bilo -20 °C. Iz skrinje je bila nato večkrat prestavljena v različne prostore in temperature.

Dogodki, ki so na sliki 4.9 označeni s črkami so opisani v tabeli 4.6. Iz grafa je razvidno, da se notranja temperatura odziva na spremembe zunanje temperature, vendar so te spremembe notranje temperature precej manj izrazite zaradi ledu. Kljub temu, da se je zunanja temperatura gibala od -20 °C do +32 °C se je notranja ohranjala in večino časa ostala med 0 °C in 10 °C. Škatla z ledom je bila čez noč na sobni temperaturi približno 10 ur.



Slika 4.9: Ob spremembi temperature okolja se z majhnim časovnim zamikom spremeni tudi temperatura v škatli. Dokler je v škatli led, se temperatura ne bo izenačila z zunanjo temveč bo konvergirala k neki vmesni vrednosti.

V točki H na grafu se je po skupno 22 urah izven skrinje stalilo približno 60% ledu. Led se je v celoti stalil po približno 40 urah, vendar je potrebno omeniti, da je bila posoda po točki H ponovno v zmrzovalniku za približno 5 ur.

Oznaka	Opis
A	Začetek (senzorji dani v skrinjo)
B	Škatla vzeta iz skrinje
C	Škatla dana v skrinjo
D	Škatla dana v hladnejši prostor
E	Škatla dana v toplejši prostor
F	Škatla dana na zunanjo temperaturo
G	Škatla dana v toplejši prostor
H	Škatla dana v skrinjo (polovica ledu staljenega)
I	Škatla dana v hladnejši prostor
J	Škatla dana v toplejši prostor
K	Prižgana električna peč v prostoru
L	Škatla postavljena pred tik pred električno pečjo

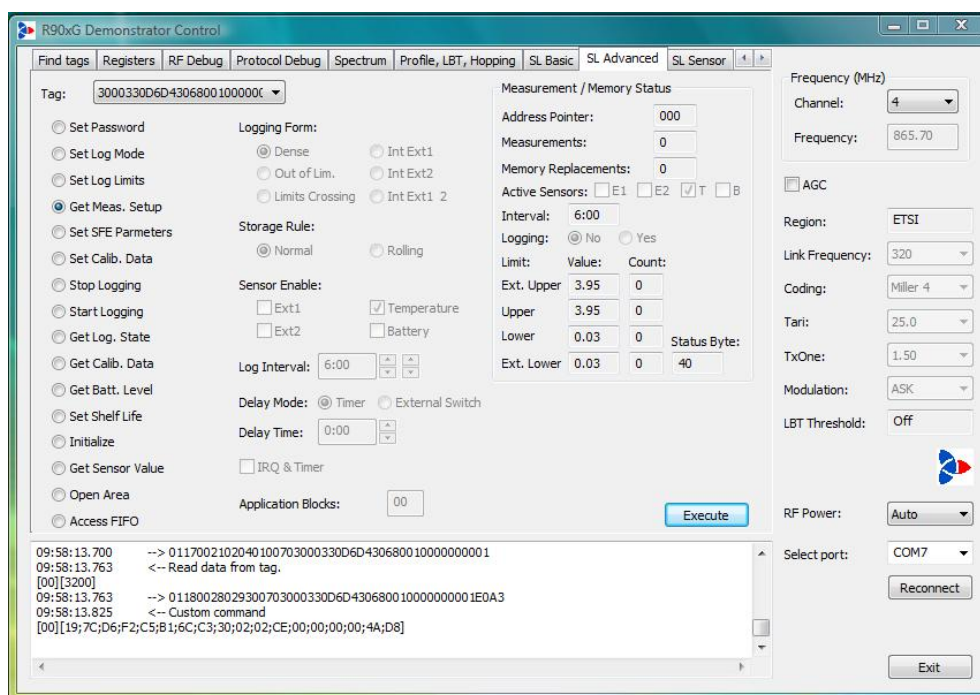
Tabela 4.6: Seznam dogodkov, ki so se zgodili med četrnim eksperimentom

Pri tem poskusu je bilo moč opaziti odstopanja pri številu meritev. Senzor v škatli je po 2160 minutah zabeležil 360 meritev, kar je točno 1 meritev vsakih 6 minut. Senzor 2 (na škatli) pa je v enakem času naredil 367 meritev, kar pomeni, da je meritve v povprečju izvajal vsakih 5 minut in 53 sekund, čeprav je bil nastavljen 6 minutni interval.

4.5 Eksperiment

V sodelovanju s podjetjem Fonda d.o.o smo dne 30. 5. 2016 izvedli 2 realna testa. Simulirali smo postopek hladne verige piranskega brancina tako, da smo v dveh paketih zapakirali po dve ribi.

S fiksnim čitalcem RFID smo inicializirali temperaturne senzorje in jih namestili v škatle in ribe. V testu A je bil paket že naslednji dan poslan uporabniku, kjer je bil še nekaj dni v hladilniku. V testu B je bil paket najprej 3,5 dni skladiščen v hladilnici, potem pa je bil poslan uporabniku, kjer je bil tudi še nekaj dni skladiščen v hladilniku.

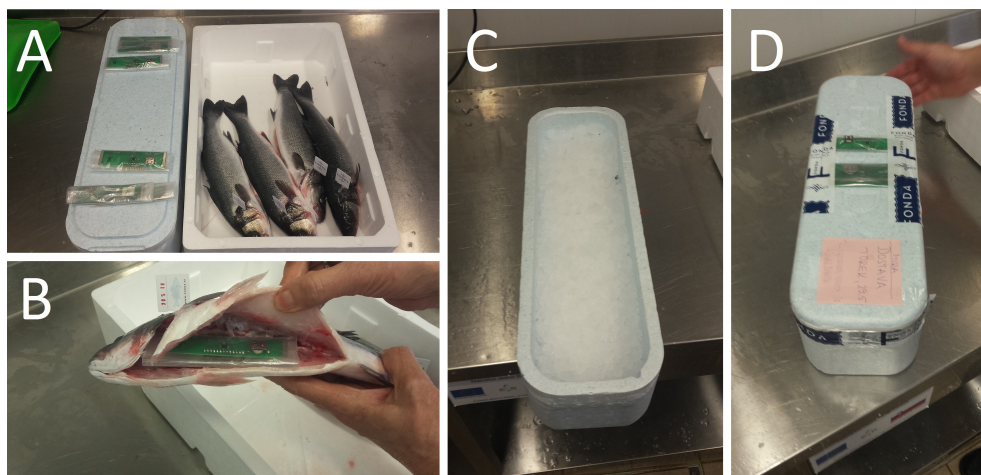


Slika 4.10: Program za komunikacijo z značkami RFID.

Scenarij je bil za oba testa definiran tako, da potrošnik naroči dvi ribi, kateri mu podjetje dostavi na dom. Ribi sta bili ujeti 30. 5. 2016 dopoldan, ob 12h pa sta bili v hladilnici. Za oba testa smo pripravili paket z dvema očiščenima ribama. Merili smo temperaturo ribe in temperaturo okolja. Temperaturne zapisovalnike smo inicializirali s čitalcem IDS in pripadajočim programom (slika 4.10). Nastavili smo zaporedno beleženje meritev (Logging Form: Dense), ki se konča, ko zmanjka pomnilnika oz. je beleženje ustavljeno (Storage Rule: Normal). Za meritve je bil uporabljen integriran temperaturni senzor, interval beleženja pa je bil 6 minut.

Po inicializaciji temperaturnih zapisovalnikov smo enega namestili v prvo

ribo, enega v drugo ribo in dva na škatlo. Tako smo imeli vse meritve podvojene v primeru, da kakšen senzor odpove.



Slika 4.11: Izvedba testa A

Na sliki 4.11 so predstavljene priprave na test A. V beli škatli so pripravljene 4 očiščene ribe, zraven pa škatla za transport s pripravljenimi moduli SL900A (A). V vsako ribo je bil vstavljen modul (B). Na dno škatle je bil vstavljen gel, ki zadržuje vlago. Na gel sta bili postavljeni dve ribi zaviti v folijo in prekrti z ledom (C). Na koncu smo škatlo zaprli in prelepili z lepilnim trakom (D).

4.5.1 Test A

Postopek testiranja je mogoče razdeliti v 3 faze:

- skladiščenje v hladilnici (14,5 h),
- transport (6 h),
- hranjenje v domačem hladilniku (56 h)

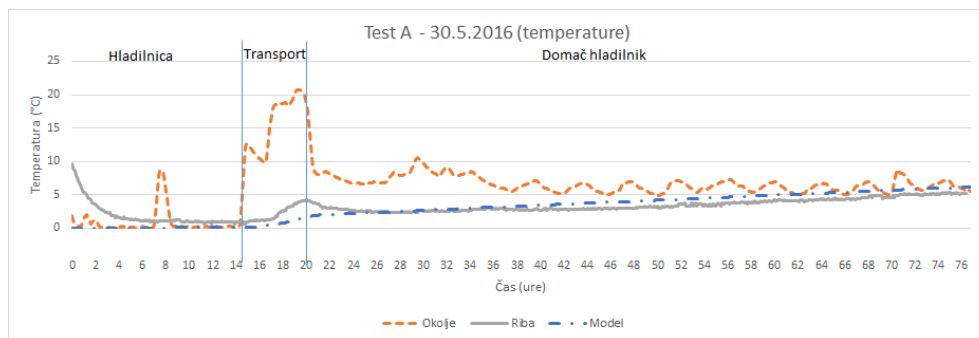
in je predstavljen s podrobnim opisom dogodkov v tabeli 4.7.

Test je trajal 77 ur in 42 minut. Pri tem pa je bilo zabeleženih 777 meritev. Po zaključku testa smo z razvito mobilno aplikacijo temperature

Čas	Dogodek
30.5.2016 13:11	Inicializacija temperaturnih senzorjev
30.5.2016 13:40	Vsi senzorji nameščeni in paket postavljen v hladilnico
31. 5. 2016 7:10	Paket dostavljen v Ljubljano
31. 5. 2016 8:35	Paket dostavljen na fakulteto
31. 5. 2016 10:00	Prevoz paketa do doma
31. 5. 2016 10:30	Paket postavljen v domač hladilnik
2. 6. 2016 18:53	Zaključek testa

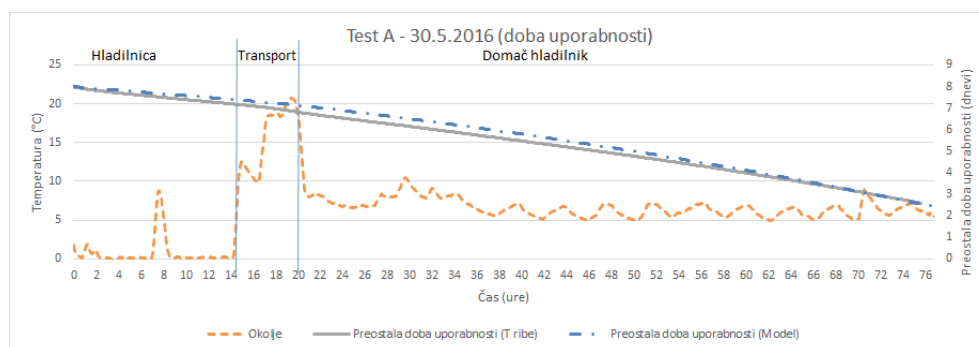
Tabela 4.7: Test A - Podroben opis dogodkov.

prebrali iz temperaturnega senzorja in uporabili 767 meritev. Prvih deset je aplikacija avtomatsko odrezala, ker je zaznala visoke temperature, kar pomeni, da takrat senzor še ni bil v ribi. Meritve so predstavljene na sliki 4.12, kjer so razvidne tudi posamezne faze v hladni verigi. Izmerjena in z modelom izračunana temperatura ribe se po 76 urah razlikujeta za 1 °C.



Slika 4.12: Test A - Temperature okolja, ribe in izračunana temperatura ribe v odvisnosti od okolja.

Slika 4.13 prikazuje temperaturo okolja in primerjavo izračuna preostale dobe uporabnosti za izmerjene temperature ribe in za model, ki preračuna temperature okolja v temperature ribe. Ta linija je v začetku malo nižja, saj so bile izmerjene temperature ribe približno 1 °C višje kot izračunane. Pri izračunu smo predpostavili, da je temperatura ribe na začetku 0 °C.



Slika 4.13: Test A - Temperature okolja in izračun preostale dobe uporabnosti.

V tabeli 4.8 so prikazani vmesni izračuni po posameznih fazah v hladni verigi. Model na začetku predpostavlja temperaturo 0 °C, zato je po 14,5 urah na podlagi modela preteklo 14,5 ur dobe uporabnosti. Na podlagi temperature ribe pa v enakem obdobju preteče 19,4 ur dobe uporabnosti, saj je izmerjena temperatura višja od 0 °C.

Faza	Pretečen čas (dan)	Pretečena doba uporabnosti (dan)		Preostala doba uporabnosti (dan)	
		Riba	Model	Riba	Model
Hladilnica	0,6	0,81	0,6	7,2	7,4
Transport	0,83	1,19	0,88	6,8	7,1
Domač hladilnik	3,15	5,4	5,5	2,6	2,5

Tabela 4.8: Test A - Izračuni za preostalo dobo uporabnosti po posameznih fazah.

4.5.2 Test B

Postopek testiranja je mogoče razdeliti v 3 faze:

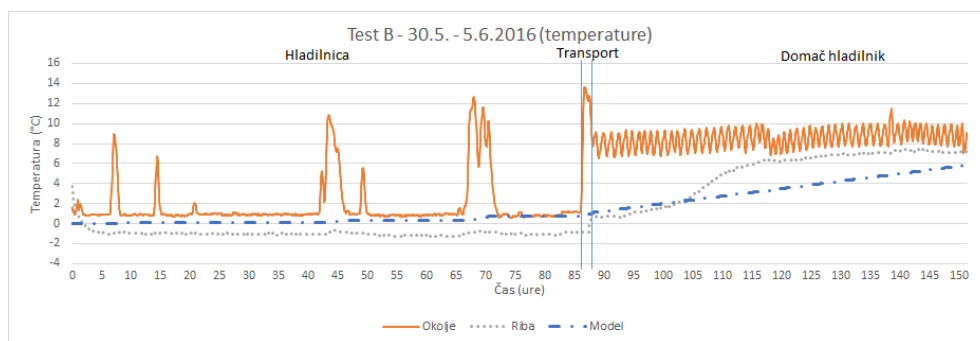
- skladiščenje v hladilnici (86 ur),
- transport (2 uri),
- hranjenje v domačem hladilniku (63 ur)

in je predstavljen s podrobnim opisom dogodkov v tabeli 4.9.

Čas	Dogodek
30.5.2016 13:25	Inicializacija temperaturnih senzorjev
30.5.2016 13:50	Vsi senzori nameščeni in paket postavljen v hladilnico
3.6.2016 6:00	Paket dostavljen v Ljubljano
3.6.2016 6:20	Paket postavljen v domač hladilnik
5.6.2016 22:20	Paket vzet iz hladilnika

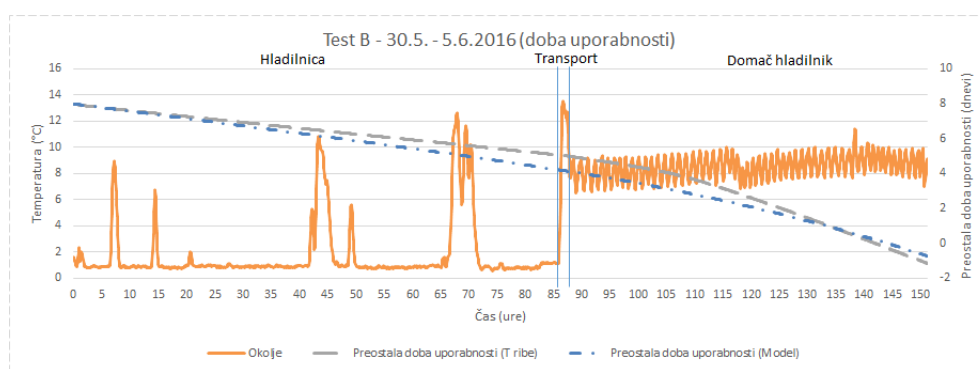
Tabela 4.9: Test B - Podroben opis dogodkov.

Med testom je bilo zabeleženih 1525 meritev kar predstavlja dobrih 152 ur beleženja. Po zaključku testa smo prebrali temperature in dobili 1513 relevantnih meritev. Prvih 8 in zadnjih 5 je algoritem avtomatsko odrezal, ker je zaznal nadpovprečno visoke temperature, kar pomeni, da takrat senzor ni bil v ribi. Meritve so predstavljene na sliki 4.14, kjer so lepo razvidne tudi posamezne faze v hladni verigi. Špice v prvi fazi so posledica odpiranja hladilnice. Z modelom izračunana temperatura je v fazi skladiščenja približno 0 °C. Med transportom in v domačem hladilniku pa se začne počasi dvigati. Na grafu je razvidno, da v zadnji fazi z modelom temperatura izračunana ne narašča tako hitro kot izmerjena temperatura ribe, vendar se proti koncu skoraj izenačita.



Slika 4.14: Test B - Temperature okolja, ribe in izračunana temperatura ribe v odvisnosti od okolja.

Z razvitim modelom smo tudi izračunali preostalo dobo uporabnosti na podlagi temperatur okolja. Za primerjavo pa je na sliki 4.15 tudi izračun preostale dobe uporabnosti na podlagi izmerjenih temperatur ribe. Ta linija je v prvi fazi bolj položna, saj so bile izmerjene temperature ribe malo nižje kot izračunane. V zadnji fazi pa začne doba uporabnosti na podlagi temperatur ribe bolj strmo naraščati. Razlog je v odzivnosti modela - ta namreč ne vsebuje strmih sprememb.

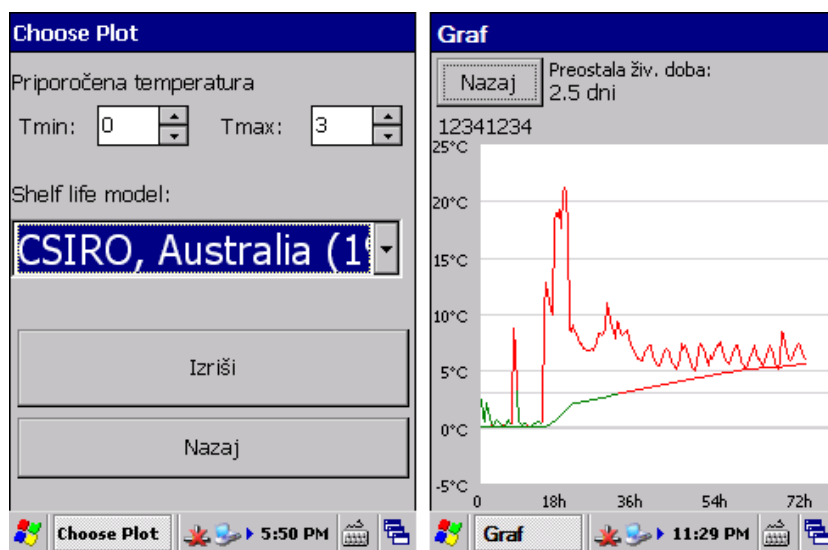


Slika 4.15: Test B - Temperature okolja in izračun preostale dobe uporabnosti.

4.5.3 Mobilna aplikacija

Za predstavitev testiranja dinamičnega modela napovedovanja preostale dobe uporabnosti smo uporabili razvito mobilno aplikacijo na napravi NordicID Morphic. Temperaturni senzor je zabeležil 819 meritev, vendar je bilo zadnjih 46 meritev odvečnih, saj so bile izvedene že po zaključku testa. Test je bil zaključen ob 18:30, zato smo pri branju nastavili, da želimo samo temperature zabeležene do 18:30 ure. Algoritem je tako odrezal zadnjih 46 meritev prav tako pa tudi prvih 6, ki so predstavljale meritve predno je bil modul pravilno nameščen. Na koncu je aplikacija uporabila 767 meritev.

V aplikaciji smo pred izrisom grafa izbrali priporočeno temperaturo ribe med 0 °C in 3 °C ter CSIRO kot algoritem za izračun preostale dobe uporabnosti (slika 4.16 levo). Na izrisanem grafu za test A (slika 4.16 desno), zgornja



Slika 4.16: Test A - Zaslonski sliki mobilne aplikacije prikazujeta temperaturni graf in statistične podatke testa.

črta predstavlja temperature okolja, spodnja črta pa z modelom izračunane temperature ribe. Temperatura ribe je bila prvih 34 ur ocenjena na $< 3^{\circ}\text{C}$, zato je tam graf obarvan zeleno, po tem obdobju pa rdeče. Nad grafom je še podatek EPC od temperaturnega zapisovalca ter izračunana preostala doba uporabnosti, ki je v našem primeru 2,5 dni.

Slika 4.17 nam predstavlja statistične podatke testa, kjer je mogoče razbrati splošni identifikator (UI) temperaturnega zapisovalnika, število meritev, najmanjšo ter največjo izmerjeno temperaturo, interval in začetek beleženja. Število meritev je končno, z že odrezanimi začetnimi in končnimi meritvami. Izbran temperaturni zapisovalnik je beležil temperaturo okolja, kar smo tudi izbrali pod vrsto meritev. Na podlagi teh meritev in modela se je izračunal tudi preostanek dobe uporabnosti, ki je 2,5 dni.

4.5.4 Analiza

Točnost modela nam pove kako blizu so izračunane temperature dejanskim temperaturam. Natančnost modela pa kako različen je odmik izračunanih



The screenshot shows a software window titled 'Statistika'. It contains the following data:

- EPC: 12341234
- Št. meritev: 767
- Min Temp: -0.02
- Max Temp: 23.92
- Interval: 00:06:00
- Začetek: 30.05.2016 13:11

Below this is a section titled 'Doba uporabnosti:' (Usability Time). It includes:

- Vrsta meritev: Okolje (selected in a dropdown menu)
- Preostanek: 2.5 dni
- Metoda: CSIRO

At the bottom of the window is a 'Nazaj' (Back) button. The Windows taskbar at the bottom shows the 'Statistika' icon, system icons, and the time '11:40 AM'.

Slika 4.17: Izbrane vrednosti za izris grafa in izračun preostale dobe uporabnosti.

temperatur od dejanskih temperatur. V primeru, da vse izračunane temperature odstopajo od dejanskih za konstantno vrednost, je natančnost zelo visoka.

Točnost modela za izračun temperature ribe. Točnost smo računali na podlagi izvedenih testov A in B. Pri testu A je povprečna razlika med izračunano in dejansko temperaturo 0,82 °C. Največja razlika pa je 2,67 °C. Pri testu B je povprečno odstopanje 1,49 °C, največje odstopanje pa 3,08 °C.

Modelu se poslabša točnost, ko pride do večjih temperaturnih sprememb, saj ima slabšo odzivnost. Pri testu A je največje odstopanje trajalo približno 2 uri, potem pa se je izenačilo. Pri testu B pa je to odstopanje trajalo skoraj več 10 ur.

Točnost modela za izračun dobe uporabnosti. Za izračun točnosti smo primerjali rezultate izračunane preostale dobe uporabnosti na podlagi dejanskih temperatur ribe in z modelom izračunanih temperatur rib. Pri testu A je bilo povprečno odstopanje 5 ur, največje odstopanje pa 9 ur.

Pri testu B je bilo povprečno odstopanje 11 ur, največje pa 23 ur. Tako lahko zaključimo, da je natančnost modela za napovedovanje preostale dobe uporabnosti ± 1 dan.

Natančnost modela. Pri naših testih je natančnost samega modela konstantna, saj se izmerjene temperature vedno preračunajo v enak rezultat. Upošteva se edino natančnost temperaturnega senzorja, ki je 1 °C. Posledično je tudi natančnost modela za izračun temperature ribe enaka 1 °C.

Poglavje 5

Sklepne ugotovitve

V magistrskem delu smo razvili model za dinamično napovedovanje dobe uporabnosti v prehranski verigi. V ta namen smo definirali in analizirali različne testne podatke o temperaturah okolja in ribe v hladni verigi. Izbrali smo tri primerne modele (Arrheniusov model, model CSIRO, tabela SAL), ki za izračun preostale dobe uporabnosti upoštevajo razvoj bakterij v odvisnosti od izpostavljenosti rib različnim temperaturam. Rezultate smo analizirali in jih uporabili za izbiro modela, ki bi bil najbolj primeren za naš pristop. Določili smo štiri faze shranjevanja rib vse od pakiranja pa do trenutka, ko uporabnik želi pripraviti ribo za okusen obrok. Za vsako fazo smo definirali spreminjanje temperature v odvisnosti od časa hranjenja in zasnovali tabelo, ki za določen temperaturni okvir okolja določa spreminjanje temperature ribe. Model za dinamično napovedovanje smo zasnovali tako, da najprej na podlagi temperature okolja izračunamo temperature ribe, ki je hranjena v škatli iz stiropora in pokrita z ledom. V modelu CSIRO smo nato tako izračunane podatke uporabili za določitev preostale dobe uporabnosti ribe.

Za uporabo modela smo razvili mobilno aplikacijo za čitalec RFID s katero lahko preberemo podatke iz temperaturnega zapisovalnika RFID (SL900A) v vsaki fazi hladne verige. Realne meritve temperature okolja se obdelajo in prikažejo v grafu skupaj s temperaturami, ki smo jih izračunali z našim modelom. Prikazana so tudi odstopanja od priporočenih temperatur shra-

njevanja rib, ki so določene na nalepkah za označevanje hitro pokvarljivih živil. Na podlagi izračunanih temperature ribe se izračuna preostala doba uporabnosti ter izpiše skupaj z drugimi statističnimi podatki.

Z namestitvijo modulov SL900A na določenem mestu bi lahko uporabniki s čitalcem RFID preverjali ustreznost hranjenja živil in ugotovili morebitne nepravilnosti. Predlagano rešitev bi lahko nadgradili tako, da se podatki pošiljajo in shranjujejo na strežnik. Rezultate bi bilo mogoče uporabiti za razne analize in za predstavitev informacij zainteresiranim potrošnikom, kateri bi lahko preverili kaj se je dogajalo z živilom in kako so temperature okolja vplivale na njegovo kakovost.

Ugotovili smo, da so izračuni z Arrheniusovim modelom v povprečju odstopali od modela CSIRO za 1 dan in 8 ur. Razlog za velika odstopanja so parametri, ki jih model upošteva. Ti izhajajo iz kemijskih zakonitosti in za naš proces nimamo dovolj točnih vrednosti. Model, ki uporablja tabelo SAL z vnaprej definiranimi dobami uporabnosti, je zelo primerljiv z metodo CSIRO (povprečno odstopanje je 5 ur) vendar izgubi na točnosti zaradi dodatnega zaokroževanja temperatur. Model CSIRO je definiran z zvezno funkcijo in zagotavlja natančnost izračuna na eno decimalo, zato smo v aplikaciji in izvedenih eksperimentih uporabili ta model.

Razvit model za izračun temperature ribe ima povprečno temperaturno odstopanje 1,16 °C, največje odstopanje pa 3,08 °C. Z modelom izračunana doba uporabnosti ima natančnost ± 1 dan. Rok uporabe za hitro pokvarljiva živila se določa na en dan natančno, kar pomeni, da natančnost razvitega modela ustreza pričakovanim rezultatom.

Pri testih smo opazili, da se ob večjih ohladitvah okolja v škatli z ledom začasno ohladi tudi riba. Te možnosti nismo vključili v modelu, ker smo ugotovili, da se njihov vpliv v testnih procesih ni pokazal kot zelo pomemben parameter. Čeprav se po določenem času temperature približajo, še vedno obstajajo možnosti za izboljšavo modela z vključitvijo in analizo dodatnih testov.

Model dinamičnega napovedovanja je zasnovan za standardni proces hla-

dne verige rib, kjer je za vsako fazo točno določen temperaturni razpon. Morebitna odstopanja bi vodila do manj natančnih rezultatov. Razvit modela je za dinamično napovedovanje dobe uporabnosti rib, vendar bi ga bilo možno z enakim pristopom prilagoditi tudi za druga živila.

Razvit sistem bi bilo možno nadgraditi z novejšo strojno opremo, ki bi podpirala vse vrste ukazov za komunikacijo moduli RFID. Tako bi lahko imeli z eno aplikacijo popoln nadzor nad zapisovalniki temperature, skozi celotno hladno verigo.

Literatura

- [1] Å. Jevinger, M. Göransson, K. Båth, A field test study on a dynamic shelf life service for perishables, Åse Jevinger toward intelligent goods: Characteristics, architectures and applications (2014) 135.
- [2] J.-K. J. Yu-Yi Chen, Yao-Jen Wang, A novel deployment of smart cold chain system using 2G-RFID-Sys, Journal of Food Engineering (141) (2014) 113 – 121.
- [3] J.-P. Rodrigue, T. Notteboom, The cold chain and its logistics (2014).
- [4] R. Price, Retail seafood temperature control, UCSGEP 90 5 (1990).
- [5] D. S. Lee, Comparison of two mechanistic microbial growth models to estimate shelf life of perishable food package under dynamic temperature conditions, Mathematical Problems in Engineering 2014.
- [6] P. Taoukis, K. Koutsoumanis, G. Nychas, Use of time–temperature integrators and predictive modelling for shelf life control of chilled fish under dynamic storage conditions, International Journal of Food Microbiology 53 (1) (1999) 21–31.
- [7] P. W. Atkins, M. J. Frazer, A. Kornhauser, S. A. Glažar, KEMIJA: zakonitosti in uporaba, Tehniška založba Slovenije, 1997.
- [8] Y.-A. Kim, S.-W. Jung, H.-R. Park, K.-Y. Chung, S.-J. Lee, Application of a prototype of microbial time temperature indicator (TTI) to the

- prediction of ground beef qualities during storage, *Korean Journal for Food Science of Animal Resources* 32 (4) (2012) 448–457.
- [9] F. C. Mark, M. Lucassen, A. Strobel, E. Barrera-Oro, N. Koschnick, L. Zane, T. Patarnello, H. O. Pörtner, C. Papetti, Mitochondrial function in Antarctic nototheniids with ND6 translocation, *PloS one* 7 (2) (2012) e31860.
- [10] G.-P. Wu, M.-J. Cao, Y. Chen, B.-X. Liu, W.-J. Su, Leucine aminopeptidase from red sea bream (*pagrus major*) skeletal muscle: purification, characterization, cellular location, and tissue distribution, *Journal of agricultural and food chemistry* 56 (20) (2008) 9653–9660.
- [11] J. P. Doyle, Seafood shelf life as a function of temperature, Alaska Sea Grant College Program, University of Alaska, 1989.
- [12] G. M. Luigi Atzori, Antonio Iera, The internet of things: A survey, *Computer Networks* 54 (15) (2010) 2787 – 2805.
- [13] L. Nord, L. Olofzon, Opportunities and challenges in the implementation of dynamic shelf life in a food supply chain (2014).
- [14] Projekt rfid-f2f, <http://www.rfid-f2f.eu/details.asp?id=1585>, [Dostopano: 26.2.2016].
- [15] M. Trebar, M. Lotrič, I. Fonda, A. Pleteršek, K. Kovačič, RFID data loggers in fish supply chain traceability, *International Journal of Antennas and Propagation* (2013).
- [16] G. Pavuna, Mobilna aplikacija za predstavitev sledljivosti in hladne verige v prehranski verigi, diplomsko delo, Univerza v Ljubljani (2013).
- [17] H. H. Huss, et al., Quality and quality changes in fresh fish., *FAO fisheries technical paper* (1995) (348).
- [18] G. Standard, Epc information services (epcis) version 1.1 specification (2007).

-
- [19] Y. Zhuang, L. Chen, X. S. Wang, J. Lian, A weighted moving average-based approach for cleaning sensor data, in: 27th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS'07), IEEE, 2007, pp. 38–38.
 - [20] AMS, SL900A EPC Class 3 Sensory Tag Chip - For Automatic Data Logging, v1-01 (5 2014).
 - [21] GS EPCglobal, EPC radio-frequency identity protocols generation-2 UHF RFID; specification for RFID air interface protocol for communications at 860 MHz–960 MHz, EPCglobal Inc., November 2013.
 - [22] Digi-Key Electronics, SL900A, [Dostopano: 30.1.2016].
URL <http://media.digikey.com/photos/AMS-Taos%20USA%20Photos/SL900A-DK-STQFN16.jpg>
 - [23] Nordic ID, Nordic ID Morhic datasheet, [Dostopano: 30.1.2016].
URL <http://www.nordicid.com/en/downloads/datasheets/nordic-id-morphic-datasheet-eu-v1011.pdf>
 - [24] AMS, IDS-R902-LPEVK2 UHF RFID Reader Low Power Evaluation KIT, rev 1.08.